

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Thème

**Etude d'un système de recharge sans fil pour
véhicules électriques utilisant des bobines réceptrices**

Préparé par :

BELALIA Messaouda Majda

FELLAH Rajaa

Devant le Jury :

Nom et Prénom

Grade

Qualité

K.NEGADI

Pr

Président

M.KOULALI

MCB

Examineur 1

B.BOUMEDIENNE

MCB

Examineur 2

H.BOURENANE

MAA

Encadrante

PROMOTION 2022 /2023.

REMERCIEMENTS

*Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à **Allah** qui nous a accordé la santé, la volonté, la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail de recherche.*

*Nous voudrions également exprimer notre sincère reconnaissance envers notre encadrante **H.BOURENANE** dont les conseils, l'expertise et le soutien continu ont été essentiels tout au long de ce projet. Ses encouragements ont été d'une grande aide dans l'accomplissement de ce mémoire.*

Un merci spécial à tous nos professeurs qui ont partagé leur savoir et leur expérience tout au long de notre parcours académique. Leurs enseignements ont façonné nos pensées et ont contribué à notre formation.

Un grand merci à nos chers collègues de Master 2 Réseaux Electrique pour leur soutien et leur collaboration tout au long de ce parcours

DEDICACES

À nos parents qui nous ont inculqué des valeurs solides et qui ont toujours cru en nous, nous vous sommes profondément reconnaissants. Votre amour, votre guidance et votre confiance ont été une source d'inspiration tout au long de ce voyage.

À nos frères et sœurs qui ont partagé les hauts et les bas, nous vous remercions pour votre présence, votre écoute et votre soutien indéfectible. Vos encouragements et vos sourires ont illuminé nos journées et nous ont donné la force de persévérer.

À nos familles nos amis et tous ceux qui nous ont soutenus, Nous tenons à vous dédier ce mémoire, symbole de notre parcours académique et de notre détermination à atteindre nos objectifs. Votre soutien inconditionnel, vos encouragements constants et votre amour ont été les piliers de notre réussite.

Majda & Rajaa

Liste Des Figures

Figure 1.1: Composants du véhicule électrique VE.....	6
Figure 1.2: Véhicule électrique à batterie (BEV).....	15
Figure 1.3: Véhicule électrique hybride rechargeable (PHEV)	15
Figure 1.4: Véhicule électrique hybride (HEV).....	16
Figure 1.5: Véhicule électrique à pile à combustible (FCEV)	17
<i>Figure 1.6: Route avec recharge sans fil</i>	23
Figure 1.7: Système WPT de Witricity	24
Figure 1.8: Système développé par Renault-Supelec	25
Figure 1.9: Différents types de pistes, (a) piste à émetteur unique, (b) piste à émetteur segmenté.....	25
Figure 1.10: Composition du système d'émetteur sans fil.....	28
Figure 1.11: Topologies WPT : (a) SS, (b) SP, (c) PS, et (d) PP.....	29
Figure 1.12: Formes de Bobines : a) circulaire, b) carré, c) rectangulaire, d) quadrature double D	30
Figure 2.1: Structure du système de transfert de puissance inductif.	34
Figure 2.2: La topologie de compensation basée sur le SS avec une charge RL.	35
Figure 2.3: Circuit équivalent de la batterie lithium-ion	41
Figure 2.4:Structure du redresseur en pont monophasé.	43
Figure 3.1: Model de Système de recharge sans fil avec une seule bobine.	46
Figure 3.2: Vue d'ensemble du système de recharge sans fil	47
Figure 3.3: Bloc du AFE.	47
Figure 3.4: Onduleur de haute fréquence	48
Figure 3.5: Circuit de couplage.....	48
Figure 3.6: Bloc du redresseur du véhicule.....	49
Figure 3.7: Bloc redresseur pour véhicule électrique.....	49
Figure 3.8: Tension et Courant de source	50
Figure 3.9: Tension et Courant de Ligne DC	51
Figure 3.10: Tension aux bornes de la bobine émettrice	51
Figure 3.11: Courant aux bornes de la bobine émettrice	52
Figure 3.12: Tension aux bornes de la bobine réceptrice.....	52
Figure 3.13: Courant aux bornes de la bobine réceptrice.....	53
Figure 3.14: Tension de la Batterie	53

Figure 3.15: Courant de La batterie	54
Figure 3.16: SOC de la batterie	54
Figure 3.17: Puissance Transmise et Reçu par la batterie	55
Figure 3.18: Vue d'ensemble du système de recharge sans fil avec deux bobines.....	55
Figure 3.19: Tension et courant de source	56
Figure 3.20: Tension et Courant DC de la Ligne	56
Figure 3.21: Tension aux bornes de la bobine émettrice	57
Figure 3.22: Courant aux bornes de la bobine émettrice	57
Figure 3.23: Tension aux bornes de la bobine réceptrice.....	58
Figure 3.24: Courant aux bornes de la bobine réceptrice.....	58
Figure 3.25: Tension de la batterie.....	59
Figure 3.26: Courant de la Batterie	59
Figure 3.27: SOC de la batterie	60
Figure 3.28: Puissance transmise et reçu par la batterie.....	60
Figure 3.29: Structure électronique d'un système de transfert d'énergie par induction à compensation série-série	61
Figure 3.30: Structure électronique d'un système de transfert d'énergie par induction à compensation série-parallèle	61
Figure 3.31: Tension et courant de source	62
Figure 3.32: Tension et Courant DC de la ligne	62
Figure 3.33: Tension aux bornes de la bobine émettrice.....	63
Figure 3.34: Courant aux bornes de la bobine émettrice	63
Figure 3.35: Tension aux bornes de la bobine réceptrice.....	64
Figure 3.36: Courant aux bornes de la bobine réceptrice.....	64
Figure 3.37: Tension de la batterie.....	65
Figure 3.38: Courant de la Batterie	65
Figure 3.39: SOC de la batterie.....	66
Figure 3.40: Puissance transmise et reçu par la batterie	66
Figure 3.41: Tension et Courant de source	67
Figure 3.42: Tension et courant DC de Ligne.....	67
Figure 3.43: Tension aux bornes de la bobine émettrice	68
Figure 3.44: Courant aux bornes de la bobine émettrice	68
Figure 3.45: Tension aux bornes de la bobine réceptrice.....	69
Figure 3.46: Courant aux bornes de la bobine réceptrice.....	69

Figure 3.47: Tension de la Batterie	70
Figure 3.48: Courant de la Batterie	70
Figure 3.49: SOC de la Batterie	71
Figure 3.50: Puissance Transmise et reçu par la batterie	71

Liste Des Tableaux

Tableau 1.1: Comparaison du rendement de différents moteurs électriques	9
Tableau 1.2: Différents modèles de véhicules électriques	9
Tableau 1.3: Indice de performance des batteries dans les véhicules électriques	12
Tableau 1.4: Caractéristiques typiques des piles à combustible	13
Tableau 1.5:Caractéristiques de charge de la norme SAE-J1772.....	17
Tableau 1.6:Aperçu des différentes méthodes de transfert d'énergie sans fil (WPT).....	27
Tableau 1.7:Spécifications des topologies WPT.	29
Tableau 1.8: Différentes formes de bobines : une brève comparaison	30
Tableau 2.1:Paramètres de l'impédance secondaire	36
Tableau 2.2:Paramètres (Prototype Renault).....	38
Tableau 2.3:Paramètre des Topologies de compensation.	39

Nomenclatures

AFE	Active Front-End/ convertisseur frontal actif
L_a	Inductance de fuite de l'enroulement primaire
L_b	Inductance de fuite de l'enroulement secondaire
L_p	Inductance propre d'une bobine
M	Inductance mutuelle
V_p	La tension primaire
R_L	Une charge résistive
I_p	Courant primaire
I_s	Courant secondaire
Z_r	L'impédance réactive entre le primaire et le secondaire
Z_s	L'impédance du système secondaire
K_n	Coefficient de couplage
P_p	Puissance primaire
P_s	Puissance secondaire
I_L	Courant de charge
V_L	Tension de charge
Q_s	Facteur de qualité
E_0	La tension constante
K_b	La résistance de polarisation
I^*	La dynamique du courant à basse fréquence
A	La tension exponentielle
B	La capacité exponentielle
V_{DC}	La tension aux bornes de la charge
FF	Le facteur de forme
n_1, n_2	Le nombre de tours des bobines
r_1, r_2	Les rayons extérieurs
M	Le rapport de transformation
C_1, C_2	Les valeurs des condensateurs résonnants
Q	La capacité restante de la batterie

η	Taux de redressement
RF	Facteur de crête
SOC	State of charge/Etat de charge
I_{bat}	Courant de batterie
η_{batt}	Les performances de la batterie
T	Le temps de décharge
IPT/TEI	Transfert d'énergie inductif traditionnel
CWPT/TESFC	Transfert d'énergie sans fil capacitif
MGWPT/TEFEM	Transfert d'énergie sans fil à engrenage magnétique
RIPT/TEIR	Le transfert d'énergie inductif résonnant
BEV/VEB	Véhicule électrique à batterie
WPT/TESEF	Transfère d'énergie sans fil
PHEV/VHR	Véhicules hybrides rechargeables
HEV/VEH	Véhicules électriques hybrides
FCEV/VEPM	Véhicules électriques à pile à combustible
CEI	Commission Électrotechnique Internationale
EVSE/ERVE	Équipement de recharge pour véhicule électrique
VRLA/BPRS	Batterie au plomb à régulation par soupape
AFC	Alcaline
PAFC	Acide phosphorique
MCFC	Carbonate fondu
SOFC	Oxyde solide
SPFC	Polymère solide
DMFC	Méthanol direct
NEMA	National electrical manufactures association
IEC	Comité internationale d'électrotechniques
SAE-J1772	Norme de sécurité
PMSM	Moteur synchrone a aiment permanent

SOMMAIRES

Remerciement

Dédicace

Liste de Figure

Liste de Tableaux

Nomenclature

Introduction Générale 1

Chapitre 1 : Etat de l'art des véhicules électriques et des technologies de recharge sans fil

1	INTRODUCTION.....	4
1.1	Historiques Des Véhicules Electriques	4
1.2	Principe du Véhicule Electrique.....	5
1.3	Principaux composants du véhicule électrique.....	6
1.3.1	Types de moteur électrique.....	7
1.3.2	Convertisseurs Statiques.....	10
1.3.3	Système de transmission d'un véhicule électrique (VE).....	10
1.	Réducteur	11
2.	Différentiel	11
3.	Arbres de Transmission.....	11
4.	Roues.....	11
1.3.4	Sources d'Energie pour les Véhicule Electriques	11
a)	Batteries.....	11
1.3.5	Piles à combustible	13
1.3.6	Super-condensateurs	14
1.4	Types de véhicules électriques.....	14
1.4.1	Véhicules électriques à batterie (VEB).....	14
1.4.2	Véhicules hybrides rechargeables (VEHR).....	15
1.4.3	Véhicules électriques hybrides (VEH).....	16
1.4.4	Véhicules électriques à pile à combustible (VEPAC).....	16
1.4.5	Différentes normes de charge des voitures électriques	17
1.5	Modes de charge	18
1.6	Sécurité des Véhicules électriques.....	18
1.6.1	Protection contre le contact direct :.....	19
1.6.2	Protection contre le contact indirect :.....	19

1.6.3	Gestion des risques et mesures de protection contre les dangers de la batterie.....	19
1.6.4	Sécurité des opérations de chargement des batteries	20
1.7	Avantages et Inconvénients de la voiture électrique	20
1.7.1	Avantages de la voiture électrique	20
1.7.2	Inconvénients des voitures électriques.....	21
1.8	Recharge des Véhicules Electriques.....	21
1.8.1	Types de charge des voitures électriques.....	21
1.9	Système de chargement sans Fil.....	22
1.9.1	Historique du WPT	23
1.9.2	Système de recharge sans fil pour les véhicules électriques.....	24
1.9.3	Méthodes de transfert d'énergie sans fil.....	26
1.9.4	Composition du système de recharge sans fil.....	27
1.9.5	Topologies de compensation	28
1.9.6	Conception de la bobine réceptrice et émettrices	29
1.9.7	Avantages et inconvénients de la technologie WPT	30
1.10	CONCLUSION.....	31

Chapitre 2: Modélisation du Système de recharge sans fil

2	INTRODUCTION.....	34
2.1	Modèle statique du système de charge sans fil.....	34
2.2	Modélisation du Système de compensation	38
2.2.1	Circuit topologique de compensation SS	39
2.2.2	Compensation des inductances SP	40
2.3	Modélisation de la batterie du VE	40
2.4	Modélisation du Redresseur	41
2.5	Modélisation de l'onduleur Haute Fréquence.....	43
2.6	Conclusion.....	44

Chapitre 3 : Simulation et analyse des performances du système de recharge sans fil

3	INTRODUCTION.....	46
3.1	Model de système de recharge sans fil.....	46
3.2	Etude comparative des différentes configurations de systèmes de recharge sans fil.....	50
3.2.1	Simulation du système de recharge sans fil à une seule bobine réceptrice utilisant la topologie SS.....	50
3.2.2	Simulation du système de recharge sans fil à deux bobines réceptrices utilisant la topologie SS.....	55
3.2.3	Système de recharge avec une seule bobine réceptrice utilisant la topologie SP ...	61
3.3	Comparaison des performances des topologies de transmission d'énergie sans fil	71

3.4 Conclusion.....	73
Conclusion Générale	75

Annexe

Bibliographie

Résumé

INTRODUCTION GENERALE

INTRODCUTION GENERALE

L'évolution rapide de la technologie a ouvert de nouvelles perspectives pour la mobilité durable, les véhicules électriques (VE) sont au cœur de cette transition vers un avenir plus écologique. Alimentés par des batteries, les VE offrent une alternative prometteuse aux véhicules à combustion interne en raison de leur faible impact environnemental et leur performance améliorée.

Cependant, l'un des défis majeurs auxquels sont confrontés les propriétaires de VE est le processus de recharge des batteries. Les méthodes traditionnelles de recharge qui impliquent l'utilisation de câbles et de bornes de recharge peuvent être contraignantes et limitent la flexibilité d'utilisation des VE. C'est là que la recharge sans fil entre en jeu.

La recharge sans fil utilise des bobines émettrices et réceptrices pour transmettre de l'énergie électrique entre une source d'alimentation et un récepteur sans avoir besoin d'un contact physique. Cette technologie est basée sur le principe de l'induction électromagnétique qui a été découvert il y a plus de 180 ans par Michael Faraday. La recharge sans fil pour les VE utilise des bobines réceptrices placées sous le véhicule et des bobines émettrices montées dans le sol ou sur des bornes de recharge. Lorsque le véhicule est stationné sur une surface équipée de bobines émettrices, l'énergie est transférée sans fil de la borne de recharge aux bobines réceptrices sous le véhicule ce qui permet de recharger la batterie [1].

Dans ce mémoire, notre étude se concentre sur l'exploration d'un système de recharge sans fil pour les VE utilisant deux bobines réceptrices. Ce système inspiré des avancées et des recherches dans le domaine, vise à améliorer l'expérience de recharge des VE en offrant une méthode plus pratique et efficace. En se basant sur les principes fondamentaux et les exemples de mise en œuvre décrits dans la littérature spécialisée, nous cherchons à approfondir notre compréhension de la recharge sans fil pour les VE et à évaluer ses avantages potentiels.

Dans le premier chapitre nous avons présenté un état de l'art détaillé sur les véhicules électriques (VE) ainsi que sur la recharge sans fil. Cette étude approfondie avait pour objectif de fournir un contexte complet et une compréhension approfondie des deux domaines clés liés à notre sujet de recherche.

Dans le deuxième chapitre de notre mémoire, nous nous sommes consacrés à la modélisation de notre système de recharge sans fil pour les véhicules électriques utilisant

deux bobines réceptrices. L'objectif de ce chapitre était de développer un modèle mathématique précis qui décrit le fonctionnement du système et permet de simuler ses performances.

Le dernier chapitre sera dédié à la simulation et à la discussion des résultats sous l'environnement MATLAB/SIMULINK, en mettant en évidence les avantages et les inconvénients de l'utilisation des bobines réceptrices pour la recharge sans fil des VE.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART DES VEHICULES ELECTRIQUES ET DES TECHNOLOGIES DE RECHARGE SANS FIL

1 INTRODUCTION

Les véhicules électriques ont été développés dès le début des années 1800 mais leur adoption a été limitée à cause de diverses raisons, notamment la faible autonomie, la durée de recharge et les coûts élevés des batteries. Cependant, au cours des dernières années, la technologie des batteries a connu des avancées significatives

Ce qui a conduit à une adoption croissante des véhicules électriques. Les systèmes de recharge sans fil pour les véhicules électriques ont également été développés pour offrir une solution pratique et sans tracas pour recharger les véhicules électriques.

Dans ce chapitre, nous exposons l'histoire des véhicules électriques et des systèmes de recharge sans fil, nous examinerons aussi les différents composants du véhicule électrique et la chaîne de traction y compris les batteries, le moteur. Ainsi que les différents types de recharge sans fil, tels que la recharge par induction, la recharge par résonance, la recharge par courant de Foucault, etc. Nous explorerons également les avantages et les inconvénients de chaque type de recharge sans fil pour les véhicules électriques et les systèmes de recharge.

Enfin, nous examinerons les défis techniques qui doivent être surmontés pour une adoption plus large de la recharge sans fil tels que la sécurité, l'efficacité et l'interopérabilité.

1.1 Historiques Des Véhicules Electriques

- **1832** : Première voiture électrique alimentée par une batterie non rechargeable. Cette voiture a été construite par le scientifique écossais Robert Anderson et était capable de parcourir environ 3 km à une vitesse de 6 km/h.
- **1859** : Invention de la première batterie rechargeable. Le physicien français Gaston Planté a inventé la batterie au plomb-acide, qui a permis le stockage et la réutilisation de l'énergie électrique.
- **1884** : Première voiture électrique de série. Le britannique Thomas Parker a construit la première voiture électrique de série, qui a été produite en petite quantité et vendue à des clients sélectionnés.
- **1891** : Premier véhicule électrique à batterie rechargeable. L'américain William Morrison a construit le premier véhicule électrique équipé d'une batterie rechargeable, qui a permis de prolonger la durée de vie et l'autonomie du véhicule.

- **1897** : Record de vitesse terrestre établi par la voiture électrique de La Jamais Contente. Conduite par le pilote français Camille Jenatzy, cette voiture a atteint une vitesse de 105,88 km/h.
- **1912** : Apogée des ventes de voitures électriques aux États-Unis. À cette époque, les voitures électriques étaient populaires pour les déplacements urbains et les livraisons en raison de leur faible bruit, de leur absence d'émissions polluantes et de leur facilité d'utilisation.
- **Années 1990** : Retour des voitures électriques avec le lancement de modèles tels que la General Motors EV1 et la Toyota RAV4 EV. Ces voitures étaient alimentées par des batteries rechargeables et avaient une autonomie de 100 à 200 km.
- **2006** : Lancement de la première voiture électrique de Tesla Motors, la Roadster. Cette voiture a permis de changer la perception des voitures électriques, avec une autonomie de 394 km et des performances comparables aux voitures à essence.
- **Années 2010** : Augmentation des ventes de voitures électriques avec le lancement de modèles tels que la Nissan Leaf, la Tesla Model S et la Chevrolet Volt. Les améliorations technologiques ont permis d'augmenter l'autonomie des batteries et de réduire les coûts de production.
- **2020** : Nouveau record des ventes mondiales de véhicules électriques, avec plus de 3 millions de voitures électriques vendues dans le monde entier. Cette tendance à la hausse est soutenue par les réglementations environnementales strictes et les incitations financières pour les véhicules électriques. [2]

1.2 Principe du Véhicule Electrique

Fondamentalement, un véhicule électrique est nécessaire pour économiser les combustibles fossiles. Il est composé d'une source d'énergie telle que la pile à combustible, système de stockage (batterie, super-condensateurs), d'un moteur relié au système de transmission afin d'entraîner la puissance aux roues du véhicule. Ensuite, le contrôleur du flux d'énergie de la source vers le moteur [3].

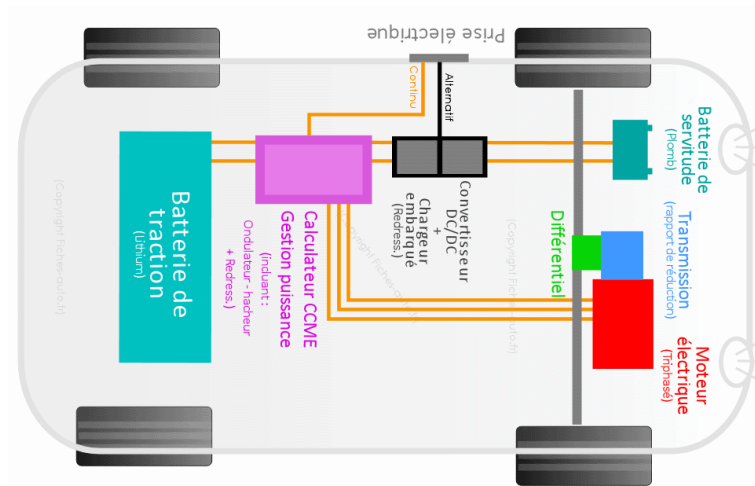


Figure 1.1: Composants du véhicule électrique VE

1.3 Principaux composants du véhicule électrique

La figure 1.1 représente les différents constituants d'un véhicule électrique.

1. **Batterie (auxiliaire tout électrique) :** dans un véhicule à propulsion électrique, la batterie auxiliaire fournit de l'électricité pour alimenter les accessoires du véhicule.
2. **Port de charge :** Le port de charge permet au véhicule de se connecter à une alimentation externe afin de recharger le pack batterie de traction.
3. **Convertisseur CC/CC :** cet appareil convertit l'alimentation CC haute tension de la batterie de traction en alimentation CC basse tension nécessaire pour faire fonctionner les accessoires du véhicule et recharger la batterie auxiliaire.
4. **Moteur de traction électrique :** Utilisant l'énergie de la batterie de traction, ce moteur entraîne les roues du véhicule. Certains véhicules utilisent des générateurs de moteur qui remplissent à la fois les fonctions d'entraînement et de régénération.
5. **Chargeur embarqué :** prend l'électricité CA entrante fournie via le port de charge et la convertit en courant continu pour charger la batterie de traction. Il communique également avec l'équipement de charge et surveille les caractéristiques de la batterie telles que la tension, le courant, la température et l'état de charge pendant la charge du pack.
6. **Contrôleur d'électronique de puissance :** Ce boîtier gère le flux d'énergie électrique délivré par la batterie de traction en contrôlant la vitesse du moteur électrique de traction et le couple qu'il produit.

7. **Système thermique (refroidissement)** : ce système maintient une plage de température de fonctionnement appropriée du moteur électrique, de l'électronique de puissance et d'autres composants.
8. **Batterie de traction** : stocke l'électricité pour l'utiliser avec le moteur de traction électrique.
9. **Transmission (électrique)** : La transmission transfère la puissance mécanique du moteur de traction électrique pour entraîner les roues [4].

1.3.1 Types de moteur électrique

Pour choisir le bon moteur pour un véhicule électrique, il est important d'évaluer différents types de moteurs en fonction de critères tels que la conception simple, la puissance spécifique, le coût d'entretien et le contrôle. Les types de moteurs les plus utilisés dans les véhicules électriques sont les moteurs à courant continu avec ou sans balais, les moteurs à induction, les moteurs synchrones à aimant permanent et les moteurs à reluctance commutée. [5].

1.3.1.1 Moteur à courant continu CC

La capacité de couple élevé du moteur à courant continu série en fait une option appropriée pour les applications de traction. C'était le moteur le plus largement utilisé pour les applications de traction au début des années 1900. Les avantages de ce moteur sont un contrôle facile de la vitesse et une capacité à supporter une augmentation soudaine de la charge. Toutes ces caractéristiques en font un moteur de traction idéal. Le principal inconvénient du moteur à courant continu série est l'entretien élevé en raison des brosses et des commutateurs. Ces moteurs sont utilisés dans les chemins de fer indiens. Ce moteur fait partie de la catégorie des moteurs à courant continu brossés (DC brushed motors) [6].

1.3.1.2 Moteur à courant continu sans balais (BLDC)

Le moteur à courant continu sans balais présente certains avantages par rapport au moteur à courant continu avec balais, tels qu'une maintenance réduite et une efficacité accrue. La commutation mécanique dans le moteur à courant continu avec balais est remplacée par un circuit de commutation électronique équivalent (circuit onduleur et élément de détection de position du rotor) dans le moteur à courant continu sans balais [5]. Selon la National Electrical Manufacturers Association (NEMA), le moteur BLDC est défini comme une

machine synchrone rotative avec un rotor à aimant permanent et des positions d'arbre de rotor connues pour la commutation électronique [7].

1.3.1.3 Moteur à induction (asynchrone)

Les moteurs asynchrones triphasés sont largement utilisés dans les véhicules électriques en raison de leur efficacité élevée, de leur bonne régulation de vitesse et de l'absence de balais. Une alimentation triphasée en courant alternatif est connectée à l'enroulement statorique, ce qui permet d'établir un champ magnétique tournant. Ce champ magnétique tournant interagit avec les conducteurs de rotor stationnaires et un courant induit circule à travers les conducteurs de rotor. Le courant induit établit son propre champ magnétique. L'interaction entre le champ magnétique tournant et le champ dû aux courants induits donne naissance à un couple unidirectionnel [7].

1.3.1.4 Moteur Synchrone à Aimants Permanents (MSAP)

Le moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) combine les caractéristiques d'un moteur à induction et d'un moteur à courant continu sans balais. Il est compact et adapté aux applications de moteurs de roues. Cependant, il présente des inconvénients tels que le coût élevé des aimants et une capacité d'affaiblissement du champ limitée en raison de la présence du champ magnétique permanent. [8]

1.3.1.5 Moteur à reluctance commutée (SRM)

Les moteurs à reluctance commutée (SRM) sont des moteurs simples et robustes, dotés d'un rotor en acier laminé sans enroulements ni aimants permanents. Cette conception réduit l'inertie du rotor, permettant ainsi une accélération rapide. Les SRM sont adaptées aux applications à haute vitesse et offrent une densité de puissance élevée, ce qui les rend attrayants pour les véhicules électriques. Le refroidissement du moteur est plus facile car la chaleur est principalement générée dans le stator. Cependant, le SRM présente des défis de contrôle et de bruit. À l'avenir, il pourrait remplacer les moteurs PMSM et à induction une fois qu'il sera disponible sur le marché commercial. [6].

1.3.1.6 Comparaison de l'efficacité des moteurs

L'efficacité de différents moteurs électriques à pleine charge et à 10% de charge sont répertoriées ci-dessous : [7].

Tableau 1.1: Comparaison du rendement de différents moteurs électriques

Type de moteur	Rendement de pointe (pourcentage)	Rendement à 10 % de charge (pourcentage)
Moteur CC à balais	85-90	80-85
Moteur MSAP	>92	80-85
Moteur à CC sans balais	>95	70-80
Moteur à induction AC	>90	>90
Moteur à réluctance commutée	<95	>90

Le Tableau 1.2 montre les caractéristiques des moteurs utilisés dans la conception de quelques véhicules électriques [9]

Tableau 1.2: Différents modèles de véhicules électriques

	Type du Moteur	Puissance	Batterie	Autonomie Tension
Smart Fortwo Electric	BLDC	55 kW	Li-ion 17.6 kWh	339 V 110km
Fiat 500° 2014	MSAP	82 kW	Li-ion 24 kWh	399 V 140km
Toyota Scion IQ	MS	47 kW	Li-ion 16.6 kWh	270 V 85km
Chevrolet Spark EV 2014	MAS	104 kW	Li-ion	370 V 130km
Ford Focus Electric	MSAP	107 kW	Li-ion 20 kWh	350 V 120km
Mitsubishi i-Miev	BLDC	49 kW	Li-ion 14.5 kWh	330 V 122km
Nissan Leaf	MSAP	80 kW	Li-ion 24 kWh	360 V 195km
Tesla model S 2013	MAS	238 à 401 kW	Li-ion 40-85 kWh	400 V 220-420km
Honda Fit EV	BLDC	92 kW	Li-ion 20 kWh	330 V 130km
Toyota RAV 4 2014	MAS	115 kW	Li-ion 41.8 kWh	386 V 160km
Fiat Panda Electra	MCC	33 kW	Li-ion 17 kWh	100km

1.3.2 Convertisseurs Statiques

Les convertisseurs statiques sont des équipements électroniques capables de transformer une source d'énergie électrique alternative ou continue, en une autre forme ou valeur. Ils sont principalement utilisés pour modifier la tension, la fréquence ou la nature du courant électrique. Ces convertisseurs sont présents dans de nombreux systèmes électroniques modernes, tels que les véhicules électriques, les systèmes d'alimentation de secours, les systèmes de production d'énergie renouvelable, etc. [10].

1.3.2.1 Redresseur (AC-DC)

Les redresseurs sont des dispositifs qui convertissent l'énergie électrique à courant alternatif en énergie électrique à courant continu. Ils existent différents types de redresseurs tels que les redresseurs à diodes, à thyristors, mixtes et en groupements de thyristors.

1.3.2.2 Onduleur (DC-AC)

Les onduleurs, quant à eux, sont nécessaires dans les véhicules électriques utilisant une machine de traction alternative. Ils permettent de convertir l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif, de régler le couple des moteurs et leur vitesse. L'onduleur à six interrupteurs bidirectionnels, composé d'un IGBT et d'une diode montée en anti-parallèle et commandé selon une loi de type MLI est le plus privilégié pour les véhicules électriques, car il repousse les harmoniques de la tension de sortie vers les fréquences élevées et facilite le filtrage de cette tension.

1.3.2.3 Hacheur (DC-DC)

Les hacheurs sont des convertisseurs de courant qui permettent d'obtenir des tensions et des courants contrôlés, réglables et adaptés aux besoins des récepteurs. Ils sont utilisés dans les véhicules électriques pour alimenter les moteurs de propulsion à courant continu et pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électroniques. Les hacheurs sont composés d'un MOSFET en parallèle à une diode [11].

1.3.3 Système de transmission d'un véhicule électrique (VE)

Il est responsable de la transmission de l'énergie produite par le moteur aux roues. Il est composé de plusieurs éléments qui travaillent ensemble pour fournir une performance optimale et une efficacité énergétique maximale. Les éléments principaux du système de

transmission d'un VE sont : le moteur électrique, le réducteur, le différentiel, arbres de transmission et les roues [12] :

1. Réducteur

Le réducteur est un composant qui réduit la vitesse de rotation du moteur pour augmenter le couple disponible aux roues. Il est souvent intégré dans le moteur électrique lui-même, mais peut également être un composant séparé.

2. Différentiel

Le différentiel est un composant qui permet aux roues de tourner à des vitesses différentes tout en transmettant la puissance du moteur. Le différentiel est généralement situé sur l'essieu arrière du véhicule.

3. Arbres de Transmission

Les arbres de transmission sont des composants qui transmettent la puissance du moteur aux roues. Les VE peuvent avoir un arbre de transmission unique ou plusieurs arbres de transmission pour alimenter les différentes roues.

4. Roues

Les roues sont les composants finaux du système de transmission qui transmettent la puissance du moteur à la route. Les roues peuvent être alimentées par un arbre de transmission, une chaîne ou un moteur intégré dans la roue elle-même [12].

1.3.4 Sources d'Énergie pour les Véhicule Electriques

Les véhicules électriques utilisent principalement des batteries comme source d'énergie. Les autres options incluent les piles à combustible, les condensateurs et les volants d'inertie. Les batteries sont actuellement la technologie la plus mature et la plus abordable, mais les piles à combustible et les super-condensateurs gagnent également en intérêt [13].

a) Batteries

Les batteries pour véhicules électriques (VE) sont des dispositifs de stockage d'énergie qui fournissent de l'électricité à un moteur électrique pour faire fonctionner un véhicule. Les batteries pour VE sont généralement composées de cellules rechargeables qui stockent de l'énergie électrique sous forme chimique. Elles sont aussi conçues pour offrir une puissance élevée et une autonomie suffisante pour permettre aux véhicules électriques de parcourir des distances raisonnables avant de devoir être rechargées. Les technologies de batteries pour VE

évoluent rapidement, avec des améliorations continues en termes de capacité, de coût et de durée de vie [14].

b) Différents types de batteries

La plupart des véhicules hybrides et électriques utilisent des batteries lithium-ion, ce système de stockage est généralement essentiel pour les véhicules électriques. En raison des progrès technologiques, la plupart des constructeurs automobiles utilisent des batteries rechargeables. Les différents types de batteries et leurs caractéristiques sont présentés ci-dessous [9] :

Tableau 1.3: Indice de performance des batteries dans les véhicules électriques

Batterie	Cellule unitaire U(V)	Durée de vie (cycle)	Température d'utilisation	Densité d'énergie	Energie spécifique (wh/kg)	Puissance crête (wh/kg)	Rendement faradique
PbO ₂ /Pb	2.1	500-700	-20 a60	75a120	30a50 25a40 35	700	82.5%
Ni-Cd	1.2	2000 1350 2000	40a60	80a150	45a80 50a60 40	200	72.5%
NI-MH	1.2	500a 100013 50 2000	-20 a60	200a330	60a110 60a70 55	900	70%
Ni-Zn	1.65	>1000	-20 a70	220a330	65a80	700	/
LI-ION	1.8-4.2v	1000 1000 3000	-20 a60	220a330	150a200 60a125 110	1500	90%
li-polymère	3.7	300 10 ans	0 a60	220a330	150a200	250	/

Le NiMH est un bon choix lorsque l'autonomie et les performances sont nécessaires. Il peut également être rechargé très rapidement, et pour les utilisations où le véhicule peut être rechargé fréquemment, cela peut donner une unité de batterie plus petite et moins chère que, par exemple, une batterie au plomb. Elle serait donc particulièrement utile pour les véhicules hybrides ou les véhicules tels que les bus ou les tramways qui s'arrêtent fréquemment et qui peuvent donc être rechargés à l'arrêt.

Les batteries au chlorure métallique de sodium (Zebra) ne sont pas utilisées dans les petites tailles car les pertes de chaleur sont proportionnellement importantes. La batterie Zebra possède de nombreux attributs du NiMH, mais avec une densité énergétique encore plus grande.

Cependant, le fait qu'elle doive être maintenue à chaud est un inconvénient majeur pour son utilisation dans les moteurs de circuits intégrés, car il s'agit en grande partie de véhicules totalement autonomes qui peuvent rester inutilisés pendant de longues périodes.

Le lithium-ion a une bonne énergie spécifique, une bonne densité énergétique et une bonne puissance spécifique. Lorsque la performance est requise, le lithium-ion est devenu l'un des principaux choix pour les voitures électriques [16].

1.3.5 Piles à combustible

Les piles à combustible produisent de l'énergie électrique en continu tant qu'elles sont alimentées en combustible, contrairement aux batteries qui ont une durée de vie limitée. Elles offrent une efficacité énergétique d'environ 40-50%, soit presque le double des moteurs à essence actuels. Il existe six principaux types de piles à combustible : alcaline (AFC), acide phosphorique (PAFC), carbonate fondu (MCFC), oxyde solide (SOFC), polymère solide (SPFC) et méthanol direct (DMFC). Parmi eux, les MCFC et SOFC sont moins adaptées aux véhicules électriques en raison de leurs températures de fonctionnement élevées. Les PAFC et AFC ont des densités de puissance théoriques plus faibles par rapport à l'AFC, ce qui les rend moins attrayantes. [17].

Tableau 1.4: Caractéristiques typiques des piles à combustible

	PAFC	AFC	MCFC	SOFC	SPFC	DMFC
Efficacité énergétique (%)	40-45	40-50	45-50	45-50	45-50	30-40
Densité de puissance (kW/m ²)	2-2.5	2-3	1-2	2.4-3	3.5-6	1.5-3.2
Température de fonctionnement	180-210	60-80	600-700	900-1000	50-100	<100

(°C)						
Coût prévu (US\$/kW)	1000	>200	1000	1500	>200	>200
Durée de vie (kh)	>40	>10	>40	>40	>40	>10

1.3.6 Super-condensateurs

Les super-condensateurs, également appelés ultra-capaciteurs, sont des dispositifs de stockage d'énergie électrochimique à haute densité de puissance. Ils offrent une petite quantité d'énergie potentielle jusqu'à 2-3 V et ont une capacité maximale de 3000 F. Les super-condensateurs présentent des avantages tels qu'une longue durée de vie, une charge/décharge rapide et une faible résistance interne. Ces trois types sont utilisés dans les véhicules électriques. [18] :

- Les super-condensateurs électrochimiques.
- Les super-condensateurs à électrodes à base d'oxydes métalliques.
- Les super-condensateurs à base de polymères.

1.4 Types de véhicules électriques

1.4.1 Véhicules électriques à batterie (VEB)

Véhicules propulsés à 100 % par l'énergie électrique. Les VEB n'ont pas de moteur à combustion interne et n'utilisent aucun type de carburant liquide. Ils utilisent normalement de grands packs de batteries afin de donner au véhicule une autonomie acceptable. Un VEB typique peut parcourir de 160 à 250 km, bien que certains d'entre eux puissent atteindre jusqu'à 500 km avec seulement une batterie. Un exemple de ce type de véhicule est la Nissan Leaf qui est 100 % électrique et dispose actuellement d'une batterie de 62 kWh qui permet aux utilisateurs d'avoir une autonomie de 360 km.

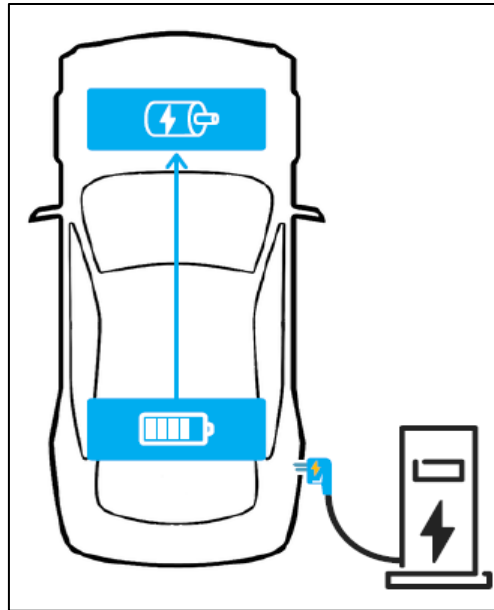


Figure 1.2: Véhicule électrique à batterie (BEV)

1.4.2 Véhicules hybrides rechargeables (VEHR)

Les véhicules hybrides sont propulsés par un moteur à combustion classique et un moteur électrique chargé par une batterie externe enfichable. Les véhicules hybrides rechargeables peuvent stocker suffisamment d'électricité provenant du réseau pour réduire considérablement leur consommation de carburant dans des conditions de conduite normales. Le Mitsubishi Outlander dispose d'une batterie de 12 kWh qui lui permet de parcourir environ 50 km uniquement avec le moteur électrique. Toutefois, il convient également de noter que la consommation de carburant des véhicules électriques hybrides est plus élevée que ce qu'indiquent les constructeurs automobiles.

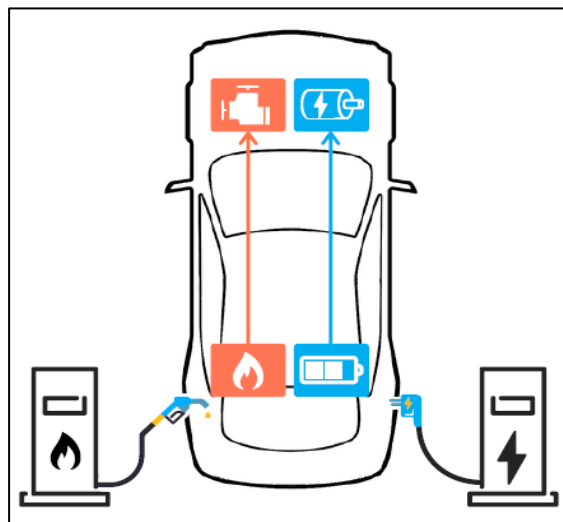


Figure 1.3: Véhicule électrique hybride rechargeable (PHEV)

1.4.3 Véhicules électriques hybrides (VEH)

Les véhicules hybrides sont propulsés par la combinaison d'un moteur à combustion interne conventionnel et d'un moteur électrique. La différence par rapport aux PHEV est que les HEV ne peuvent pas être branchés sur le réseau. En effet, la batterie qui alimente le moteur électrique est rechargée grâce à l'énergie générée par le moteur à combustion du véhicule. Dans les modèles modernes, les batteries peuvent également être rechargées grâce à l'énergie générée lors du freinage, transformant l'énergie cinétique en énergie électrique. La Toyota Prius, dans sa version hybride (4ème génération), disposait d'une batterie de 1,3 kWh qui lui permettait théoriquement une autonomie de 25 km en mode tout électrique.

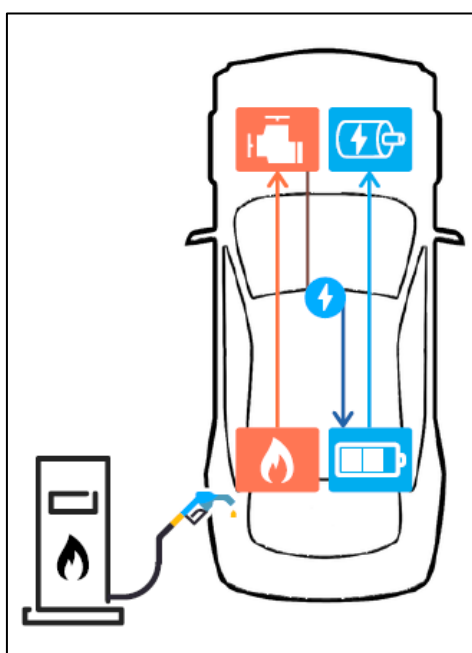


Figure 1.4: Véhicule électrique hybride (HEV)

1.4.4 Véhicules électriques à pile à combustible (VEPAC)

Ces véhicules sont équipés d'un moteur électrique qui utilise un mélange d'hydrogène comprimé et d'oxygène obtenu à partir de l'air, l'eau étant le seul déchet résultant de ce processus. Bien que ces types de véhicules soient considérés comme présentant "zéro émission", il convient de souligner que, bien qu'il existe de l'hydrogène vert, la plupart de ces véhicules ne produisent pas de gaz à effet de serre, la majeure partie de l'hydrogène utilisé est extraite du gaz naturel. La Hyundai Nexo est un exemple de ce type de véhicule, capable de parcourir 650 km sans faire le plein [14].

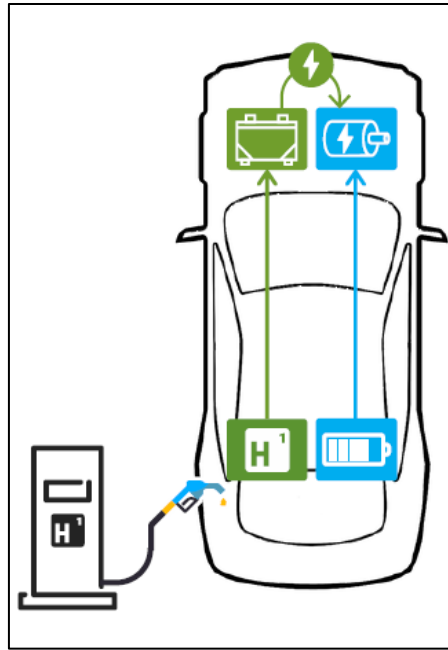


Figure 1.5: Véhicule électrique à pile à combustible (FCEV)

1.4.5 Différentes normes de charge des voitures électriques

Différentes normes sont utilisées pour la recharge des véhicules électriques, principalement déterminées par la région d'utilisation. En Amérique du Nord et dans la zone Pacifique, la norme SAE-J1772 est utilisée, tandis qu'en Chine, c'est la norme GB/T20234, et en Europe, la norme IEC-62196 est utilisée. La principale différence entre ces normes réside dans la classification des modes de charge, basée soit sur le type d'alimentation (courant continu ou courant alternatif) dans les deux premières normes, soit sur la puissance de charge dans la dernière norme.

Le mode SAE-J1772 est une norme nord-américaine de connecteurs électriques pour les véhicules électriques créée en 1996 et soutenue par la Commission européenne. Cette norme est commune aux États-Unis et au Japon, et elle établit les niveaux de charge suivants (voir tableau 5) [14].

Tableau 1.5: Caractéristiques de charge de la norme SAE-J1772

Méthode de charge	Volts	Courant maximal (ampères continus)	Puissance maximale
AC niveau 1	120 V	16 A	1.9 kW
AC niveau 2	240 V	80 A	19.2 kW
CC niveau 1	200 V	80 A	40 kW
CC niveau 2	200 V	200 A	100 kW

1.5 Modes de charge

La norme **IEC-62196** est une norme internationale créée par la Commission électrotechnique internationale (**CEI**) en 2001 pour la recharge des véhicules électriques en Europe et en Chine. La norme **IEC-62196** définit les caractéristiques générales du processus de charge, ainsi que la manière dont l'énergie est utilisée. Cette norme découle de la **CEI-61851** et elle fournit une première classification du mode de charge en fonction de sa puissance nominale et par conséquent du temps de charge. Les utilisateurs disposent de quatre modes pour charger les véhicules (voir tableau 10) [38].

- **Mode 1 (charge lente) :** Il est défini comme un mode de charge domestique, avec une intensité maximale de 16 A, et utilise une prise de courant standard monophasée ou triphasée, avec des conducteurs de phase, de neutre et de terre de protection. Ce mode est le plus utilisé dans nos maisons.
- **Mode 2 (charge semi rapide) :** Ce mode peut être utilisé à la maison ou dans les lieux publics son intensité maximale définie est de 32 A et, comme pour le mode précédent, il utilise des prises de courant normalisées avec des conducteurs de phase, de neutre et de terre de protection.
- **Mode 3 (charge rapide) :** Il fournit une intensité comprise entre 32 et 250 A. Ce mode de charge nécessite l'utilisation d'un système d'alimentation pour VE et un dispositif assure la communication avec les véhicules, surveille le processus de charge et intègre des systèmes de protection.
- **Mode 4 (charge ultra-rapide) :** Publié dans la norme IEC-62196-3, il définit une connexion directe du VE au réseau d'alimentation en courant continu avec une intensité de puissance allant jusqu'à 400 A et une tension maximale de 1000 V, ce qui donne une puissance de charge maximale de 400 kW. Ce mode nécessite également un chargeur externe qui assure la communication entre le véhicule et le point de charge [38].

1.6 Sécurité des Véhicules électriques

Les véhicules électriques sont fortement demandés ces derniers temps et comme toute autre technologie présente des dangers celle-là n'est pas moins périlleuse et nécessite également une sécurité qui dépend de nombreux facteurs comme la conception et la fabrication des batteries, le système de charge et le système de gestion de la batterie [39].

Nous distinguons ci-dessous les risques et les moyens de protection contre le contact direct et indirect :

1.6.1 Protection contre le contact direct :

Protection des personnes contre tout contact direct avec les parties électriques actives du système de traction qui doit être assuré par une isolation adéquate et par une position inaccessible de ces parties.

1.6.2 Protection contre le contact indirect :

Le problème de contact indirect est souvent lié aux problèmes de structure. Un contact entre le circuit de traction et la structure peut conduire à des situations dangereuses telles que : Les court-circuit, électrocution et comportement imprévu et/ou incontrôlé du véhicule.

- Pour la protection contre l'électrocution, il faut renforcer Le boîtier des batteries
- Pour la protection contre le court-circuit, il faut placer des dispositifs de sécurité tels que des fusibles au centre électrique de la batterie.

1.6.3 Gestion des risques et mesures de protection contre les dangers de la batterie

1.6.3.1 Risque d'électrolyte

Pour les batteries au plomb, le danger majeur provient de l'électrolyte (acide sulfurique), or des précautions supplémentaires doivent être prises durant la maintenance. En cas d'accident, il faut porter une attention particulière à ce que l'électrolyte ne soit pas renversé sur les passagers ou toute autre personne à proximité.

1.6.3.2 Risque réactif

La batterie au sodium-soufre totalement scellée, un contenant de sécurité thermique renferme les réactifs (sodium et soufre). Cette batterie contient généralement plusieurs petites cellules ce qui limite et minimise la quantité de matière dangereuse libérée en cas d'accident.

1.6.3.3 Risque de toxicité

La sécurité intrinsèque de la batterie au zinc bromine est généralement élevée. La solution de bromine est hautement toxique mais elle est caractérisée par un faible degré de réactivité. Le danger majeur associé à ce type de batteries est la libération de bromine ou de composant de bromine en cas d'incendie.

1.6.3.4 Risque d'explosion

Les batteries ayant un électrolyte aqueux émettent de l'hydrogène résultant de l'électrolyse de l'électrolyte, surtout durant la fin de charge, donc des précautions particulières doivent être prises :

La concentration d'hydrogène ne doit pas dépasser 0.8 % durant le fonctionnement normal et 3.5 % en cas de défaillance n'importe où dans le véhicule.

Les dispositifs susceptibles de produire de la chaleur ou des étincelles ne doivent pas être disposés dans des endroits où un éventuel mélange air /gaz peut avoir lieu.

Les fumées des batteries doivent être ventilées, et ne jamais atteindre l'intérieur du véhicule. En cas d'utilisation des batteries au plomb à recombinaison de Gaz (VRLA), il faut prendre en considération qu'une libération d'hydrogène est possible en cas de surcharge.

1.6.4 Sécurité des opérations de chargement des batteries

Durant le chargement de la batterie, la voiture se trouve connectée au réseau principal d'électricité, donc des mesures de prévention doivent être prises pour éviter le risque d'électrocution. Ces mesures de prévention dépendent principalement du type de chargeurs :

- Chargeur externe
- Chargeur embarqué

1.6.4.1 Maintenance

Pour les voitures électriques, il y a trois niveaux de maintenance à considérer :

- **Maintenance premier niveau** : par l'utilisateur par exemple le nettoyage de véhicule
- **Maintenance deuxième niveau** : dans un atelier par des personnes qualifiées par exemple maintenance mécanique, remplacement des contrôleurs
- **Maintenance troisième niveau** : dans l'atelier du fabricant par exemples : des réparations électriques majeures à faire par des personnes qualifiées seulement [38]

1.7 Avantages et Inconvénients de la voiture électrique

1.7.1 Avantages de la voiture électrique

Les avantages des véhicules électriques sont multiples, nous exposons ci-dessous quelques-uns :

- Ce type de véhicules n'émet pas de polluants.
- Le nombre d'éléments du moteur du véhicule électrique (VE) est plus faible.

- Moins de pannes.
- Le coût de d'entretien est faible.
- Plus confortable.
- Plus efficaces que les véhicules traditionnels.
- La possibilité d'accéder aux zones urbaines interdites aux autres véhicules à combustion.

1.7.2 Inconvénients des voitures électriques

Les inconvénients des VE peuvent être résumés comme suit [40] :

- Une autonomie limitée.
- Le temps de recharge est assez long.
- Les couts d'achat sont plus chers.
- Les batteries ont une durée de vie limitée.
- Les batteries sont lourdes.

1.8 Recharge des Véhicules Electriques

Après avoir exploré les différents types de batteries utilisées dans les véhicules électriques précédemment, nous allons maintenant nous pencher sur le processus crucial de chargement de ces batteries. En effet, comme toute source d'énergie, les batteries des véhicules électriques ont besoin d'être rechargées régulièrement pour assurer une autonomie optimale. C'est pourquoi le développement de systèmes de recharge rapide et efficace est un enjeu majeur pour l'industrie automobile et l'adoption massive des véhicules électriques. Il existe plusieurs types de charge.

1.8.1 Types de charge des voitures électriques

En fonction des caractéristiques d'utilisation des batteries et de la charge, il existe quatre types de charge pour les voitures électriques.

- **Chargement mécanique**

La charge mécanique consiste à remplacer une batterie épuisée par une batterie entièrement chargée. Cela nécessite des équipements spécialisés en raison du poids des

batteries. Les utilisateurs de voitures électriques peuvent louer une batterie chargée pour un remplacement rapide, ce qui améliore l'efficacité et la commodité. La recharge en heures creuses réduit les coûts et améliore l'efficacité opérationnelle.

Elle offre des avantages tels qu'une réduction du temps de charge, une augmentation de l'autonomie et une détection précoce des problèmes de batterie. Réduire la profondeur de décharge prolonge également la durée de vie de la batterie.

- **Chargement sans fil**

La recharge sans fil des voitures électriques est considérée comme une solution d'avenir en raison du manque d'espace de stationnement dans les villes. Cette méthode évite la nécessité de construire de nouvelles stations fixes de recharge et réduit les dommages aux installations publiques existantes. La recharge sans fil offre une méthode pratique et sans câbles à fixer, ce qui la rend attrayante pour les conducteurs. De plus, elle permet de maintenir la batterie de la voiture électrique entre 40 % et 80 %, ce qui contribue à prolonger sa durée de vie. [19].

- **Chargement avec fil**

La recharge avec fil pour les véhicules électriques (VE) fait référence au processus de fourniture d'énergie électrique aux véhicules à l'aide d'un câble physique connecté à une source d'alimentation. Cette méthode de recharge implique le branchement du câble de charge du VE à une borne de recharge ou à une prise électrique dédiée, permettant ainsi le transfert d'énergie de la source vers la batterie du véhicule [19].

1.9 Système de chargement sans Fil

La figure 1.6 présente un exemple sur le système de charge sans fil (WPT) utilisé pour recharger les véhicules électriques (EV) lorsqu'ils sont stationnaires. Il offre une solution simple et fiable, mais présente aussi des limitations tels que la nécessité d'être garé et des problèmes de compatibilité électromagnétique. Des recherches sont en cours pour développer des systèmes de charge sans fil dynamiques qui permettent de recharger les véhicules pendant qu'ils sont en mouvement, ce qui augmente l'autonomie et réduit le coût des batteries. Cependant, ces systèmes posent également des défis techniques comme la portée limitée et l'efficacité accrue [26].

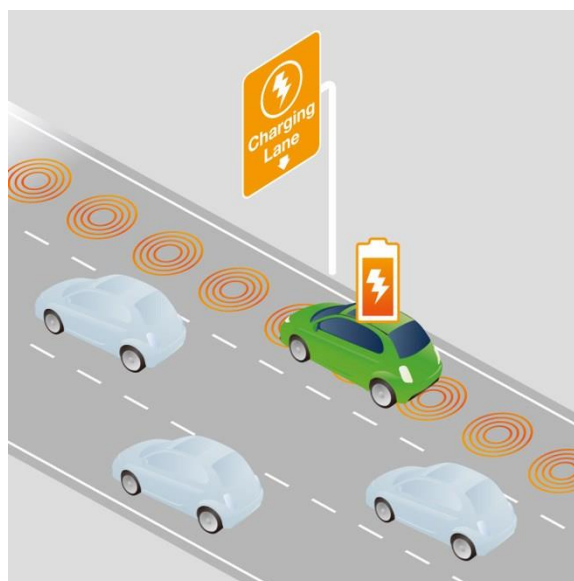


Figure 1.6: Route avec recharge sans fil

1.9.1 Historique du WPT

- **1901** : Nicola Tesla était capable de transférer de l'énergie d'une bobine à une autre sans fil, il a réussi à allumer 200 lampes pour une distance de 40km. En raison d'un manque de fonds, la tour n'a pas fonctionné.
- **1987** : Le premier brevet pour la recharge sans fil a été déposé par une entreprise nommée General Motors.
- **2006** : Le concept de la recharge sans fil pour les VE est présenté au public pour la première fois par la startup Evatran, lors de la conférence Plug-in 2006.
- **2010** : L'entreprise allemande Siemens présente un prototype de recharge sans fil pour VE à la foire commerciale Hannover Messe.
- **2013** : La première installation publique de recharge sans fil pour VE est mise en place à Gumi, en Corée du Sud.
- **2014** : La norme SAE J2954 est publiée, établissant des standards de recharge sans fil pour les VE.
- **2017** : Le constructeur automobile BMW commence à proposer une option de recharge sans fil pour son modèle de VE, la BMW 530e iPerformance.
- **2018** : L'entreprise californienne WiTricity annonce la commercialisation de sa technologie de recharge sans fil pour les VE. [25]

1.9.2 Système de recharge sans fil pour les véhicules électriques

1.9.2.1 Charge Statique

Un système de recharge sans fil qui nécessite un arrêt du véhicule pour permettre le transfert d'énergie. Dans ce cas, le véhicule se positionne sur une station de recharge spécifique, équipée de dispositifs de couplage magnétique ou d'induction, afin de recevoir l'énergie nécessaire pour recharger sa batterie. Ce type de recharge est souvent utilisé dans les parkings, les garages résidentiels ou les stations de recharge dédiées, où les véhicules peuvent s'arrêter pendant une période de temps suffisante pour permettre la recharge [41].



Figure 1.7: Système WPT de Witricity

1.9.2.2 Charge Dynamique

Un système de recharge sans fil des véhicules électriques qui permet de recharger la batterie du véhicule en mouvement sans arrêt complet comme sur la figure 1.8, Ce type de recharge repose généralement sur des technologies telles que l'induction magnétique ou les technologies à micro-ondes, qui permettent de transférer de l'énergie de manière continue au véhicule pendant son déplacement. Ainsi, le véhicule peut être rechargé tout en étant en mouvement, ce qui offre une plus grande flexibilité et une autonomie accrue [41].



Figure 1.8: Système développé par Renault-Supelec

Il existe deux solutions techniques pour la recharge dynamique. La différence provient de la forme des bobines à côté de la piste. Les pistes peuvent être soit à émetteur segmenté, soit à émetteur unique, comme c'est présenté sur la figure 1.9 :

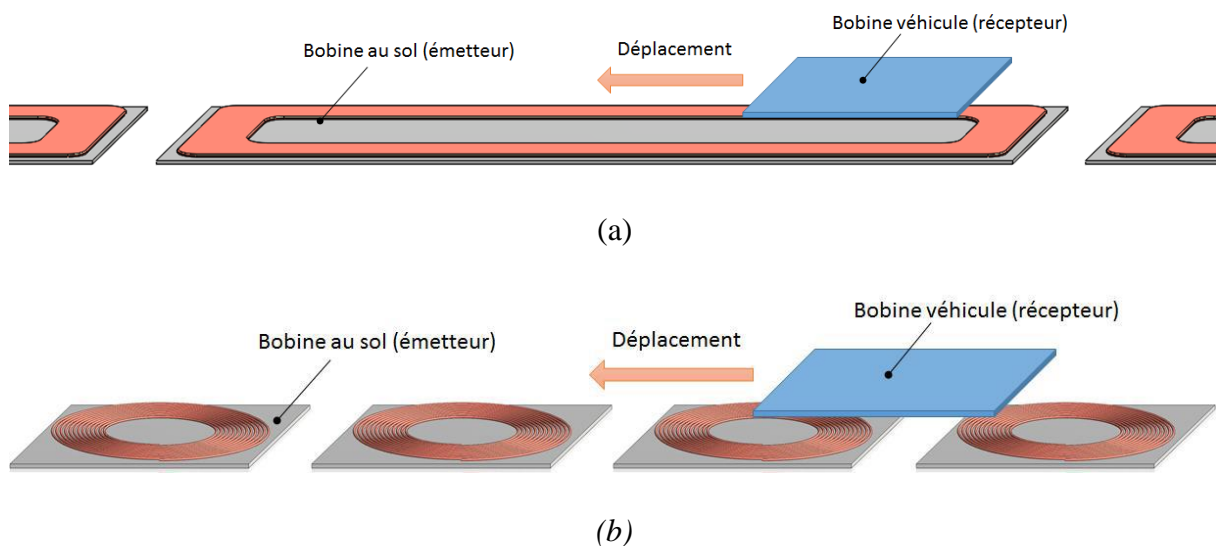


Figure 1.9: Différents types de pistes, (a) piste à émetteur unique, (b) piste à émetteur segmenté

Pour les systèmes à émetteur unique (Figure 1.9.a) la bobine réceptrice est de taille réduite par rapport à la bobine émettrice qui est de forme allongée dans la direction de déplacement du véhicule. Ce type de piste permet d'avoir un couplage relativement constant tout au long de l'émetteur. Pour les pistes segmentées, il n'y a pas de différence de taille remarquable entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice (Figure 1.9.b). Ce type de piste nécessite de connaître la position du véhicule en temps réel afin d'alimenter au fur et à mesure les bobines sous le véhicule. Ce système permet de réduire significativement les rayonnements électromagnétiques parasites à proximité de la piste [41].

1.9.3 Méthodes de transfert d'énergie sans fil

Depuis l'introduction des systèmes de recharge sans fil pour les VE, quatre méthodes de conception de WEVCS ont été utilisées : le transfert d'énergie inductif traditionnel (IPT), le transfert d'énergie sans fil capacitif (CWPT), le transfert d'énergie sans fil à engrenage magnétique (MGWPT) et le transfert d'énergie inductif résonnant (RIPT). Le tableau 6 présente le résumé des technologies de transfert d'énergie sans fil disponibles pour les véhicules électriques fonctionnant sur batterie (BEV) [29].

1.9.3.1 Le transfert d'énergie Inductif

La méthode inductive de TPSF utilise un champ magnétique alternatif pour transférer l'énergie électrique d'une bobine émettrice à une bobine réceptrice, qui est généralement placée à proximité immédiate de la bobine émettrice. Cette méthode est souvent utilisée dans les applications de charge sans fil pour les petits appareils électroniques tels que les smartphones et les montres connectées. [29]

1.9.3.2 Le transfert d'énergie Capacitif

La méthode capacitive de TPSF utilise un champ électrique alternatif pour transférer l'énergie électrique d'une plaque émettrice à une plaque réceptrice, qui est généralement placée à proximité immédiate de la plaque émettrice. Cette méthode est souvent utilisée dans les applications de charge sans fil pour les petits appareils électroniques tels que les smartphones et les montres connectées. [30]

1.9.3.3 Le transfert d'énergie a engrenage magnétique

La méthode d'engrenage magnétique de TPSF utilise des aimants permanents pour générer un champ magnétique statique qui est utilisé pour transférer l'énergie électrique d'une bobine émettrice à une bobine réceptrice. Cette méthode est souvent utilisée dans les applications de charge sans fil pour les véhicules électriques. [31]

1.9.3.4 Le transfert d'énergie Inductif résonant

La méthode inductive résonante de TPSF utilise une bobine émettrice et une bobine réceptrice accordées à la même fréquence de résonance, ce qui permet un transfert d'énergie plus efficace que la méthode inductive classique. Cette méthode est souvent utilisée dans les applications de charge sans fil pour les véhicules électriques et les robots. [32]

Tableau 1.6: Aperçu des différentes méthodes de transfert d'énergie sans fil (WPT)

Méthodes	Performances			Prix	volume	Complexité de la conception	Niveau de puissance	Adaptation WEVCS
	Efficacité	EMI	Fréquence Hz					
Inductive	Moyen/élevé	moyen	10-50	Moyen/élevé	moyen	moyen	Moyen/élevé	élevé
Capacitive	Faible/moyen	moyen	100-600	Faible	faible	Moyen	Faible	Moyen/faible
Aimant p	Faible/moyen	élevé	0.05-0.500	Elevé	élevé	élevé	Moyen/faible	Moyen/faible
Inductif résonant	Moyen/élevé	faible	10-150	Moyen/Elevé	moyen	moyen	Moyen/faible	élevé

1.9.4 Composition du système de recharge sans fil

L'étude analyse le système de recharge sans fil, composé d'un émetteur fixe sur la route et d'un récepteur sous le véhicule. L'émetteur génère un flux magnétique haute fréquence, couplé avec la bobine réceptrice, pour convertir l'énergie électrique utilisée pour charger la batterie du véhicule. Des équipements électroniques assurent l'adaptabilité entre les récepteurs et la source d'énergie. Un convertisseur frontal actif contrôle la tension, un correcteur de facteur de puissance assure la stabilité du réseau, et un convertisseur en pont complet haute fréquence alimente la bobine de l'émetteur. La méthode de compensation et la conception des bobines influencent la rentabilité du système [42]. la figure 1.10 montre les composants de ce système.

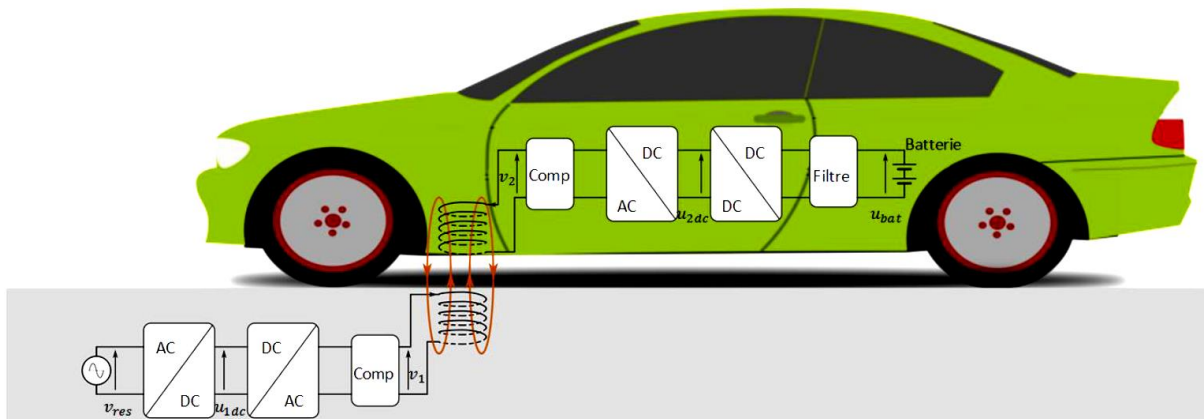


Figure 1.10: Composition du système d'émetteur sans fil.

1.9.5 Topologies de compensation

Quatre topologies de circuit résonnant peuvent être utilisées dans le système de transfert d'énergie sans fil (WPT). Leur indexation a eu lieu après l'insertion du condensateur de chaque côté. En supposant que la connexion peut être en parallèle (P) et/ou en série (S) avec la bobine ; les topologies sont : Série-Série (SS), Série-Parallèle (SP), Parallèle-Série (PS) et Parallèle-Parallèle (PP). Ces schémas sont illustrés sur la figure 1.11.

Les première et deuxième valeur d'inductances et de condensateurs notées (L_1 , L_2) et (C_1 , C_2) sont fixées pour la gestion du filtre. Les circuits primaires et les circuits secondaires, respectivement l'inductance et la capacité du coupleur, sont utilisés pour améliorer le transfert de puissance, minimiser la puissance apparente de la source d'entrée, et assurer la transmission de la puissance active à la charge [33].

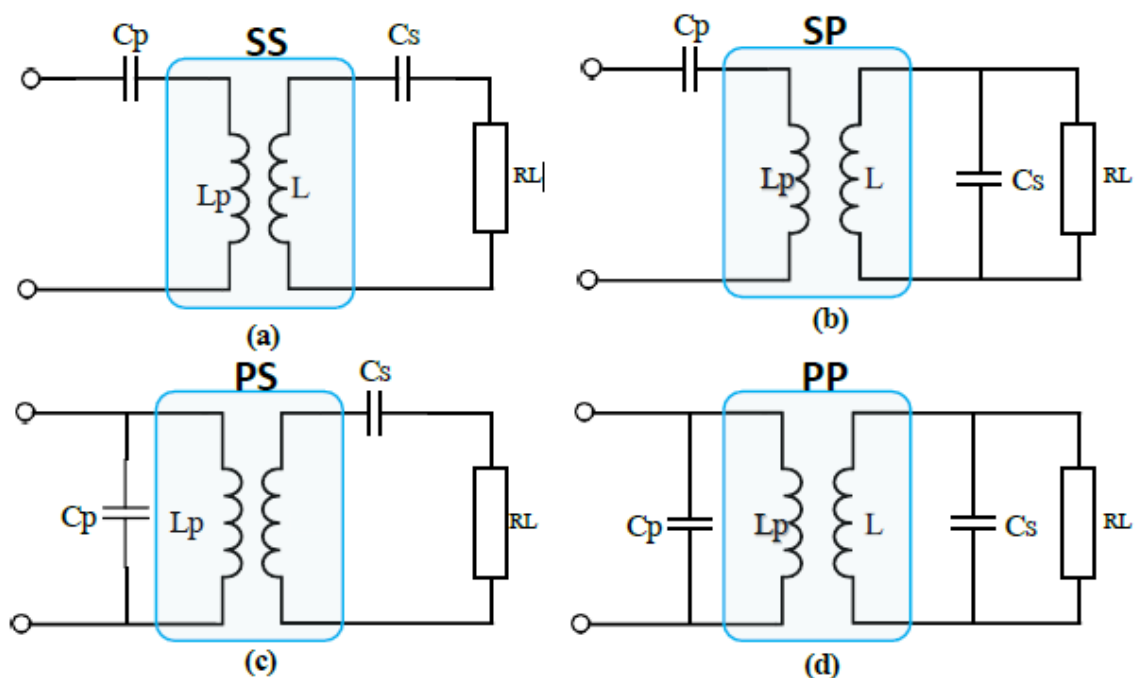


Figure 1.11: Topologies WPT : (a) SS, (b) SP, (c) PS, et (d) PP

La compensation de la source dans le système de recharge sans fil est essentielle pour éliminer le déphasage entre le courant et la tension et minimiser la puissance réactive. Différentes topologies de réseau de compensation sont utilisées, et elles dépendent des exigences spécifiques de l'application. Les systèmes à compensation PS et PP offrent une protection en cas de désalignement entre la source et le récepteur, mais ils peuvent avoir des limitations de puissance. La topologie compensée par SS est plus adaptée aux applications de véhicules électriques car elle offre des avantages tels qu'une valeur de condensateur indépendante des conditions de charge et un maintien du facteur de puissance unitaire. Ce système permet une charge plus efficace de la batterie avec une tension et un courant constant. Le choix du réseau de compensation dépend des besoins spécifiques et des caractéristiques du système de recharge sans fil. [26]

Tableau 1.7: Spécifications des topologies WPT.

Caractéristiques	SS	SP	PS	PP
La sensibilité du facteur de puissance sur une distance	Faible	Faible	Modéré	Modéré
L'impédance à l'état de résonance	Faible	Faible	Elevé	Elevé
Adaptation à l'application EV	Elevé	Elevé	Modéré	Modéré
Capacité de transfert de puissance	Elevé	Elevé	Faible	Faible
Tolérance d'alignement	Elevé	Elevé	Modéré	Faible
Tolérance de fréquence sur le rendement	Faible	Elevé	Faible	Elevé

1.9.6 Conception de la bobine réceptrice et émettrices

La conception d'un transformateur sans fil à noyau d'air est utilisée dans le TPSF pour permettre le flux d'énergie électrique de la source vers les côtés du récepteur. Comme c'est présenté sur la figure 1.12, diverses formes de bobines planes telles que circulaires, rectangulaire, double D et quadrature D ont été utilisées dans la conception des transformateurs sans fil pour améliorer les performances et résoudre les problèmes de désalignement entre la source et le récepteur [34].

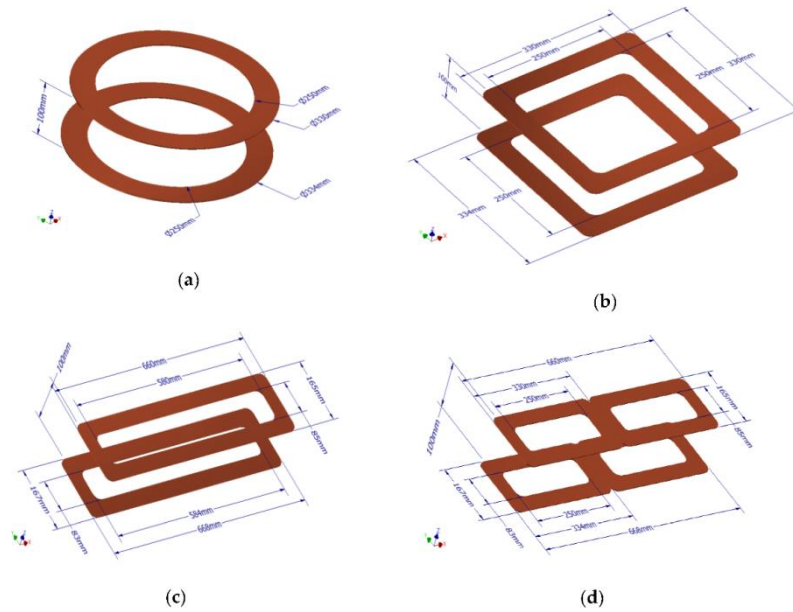


Figure 1.12: Formes de Bobines : a) circulaire, b) carré, c) rectangulaire, d) quadrature double D

Tableau 1.8: Différentes formes de bobines : une brève comparaison

Type de bobine	Critères	De	Comparaison
	Type de polarisation	Trajet du flux	Zone nulle
Circulaire	Génération de flux perpendiculaire non polarisé	Un quart du diamètre de la plaquette	A 40% du diamètre de la plaquette
Bobine rectangulaire	Génération de flux perpendiculaire non polarisé	Presque égal au diamètre du plot	50% du diamètre du plot
Double-D	Génération de flux parallèle polarisé	Deux fois la circulaire	À environ 77 % de la longueur de la pastille
Quadrature D	Les petites sections sont polarisées, le flux perpendiculaire domine	A 4/5 de la longueur de la pastille	Ne se produit pas pour l'émetteur étendu

1.9.7 Avantages et inconvénients de la technologie WPT

1.9.7.1 Avantages

- **Fonctionnement autonome** : La charge/décharge peut être effectuée sans l'intervention du conducteur. Cette autonomie est particulièrement importante pour les tâches qui impliquent le transfert d'électricité du véhicule au réseau.

- **Charge plus sûre** : Le conducteur ne risque pas d'entrer en contact avec un courant électrique puissant, car il n'a pas besoin d'en utiliser un. De plus, dans des conditions météorologiques défavorables, telles que les chutes de neige ou la pluie, cette transmission d'énergie est totalement sûre.
- **Charge dynamique** : Grâce au TPSF, les véhicules électriques peuvent être rechargés lorsqu'ils sont en mouvement ou à l'arrêt pendant une courte période. Une batterie de VE plus petite permettra à la voiture de fonctionner avec des équipements électriques moins coûteux si ce type de charge devient plus courant.

Ces avantages s'appliquent à toutes les formes de véhicules électriques, y compris les automobiles, les pédalos, les transports urbains, les chemins de fer, les yachts, etc. La technologie de la résonance magnétique est utilisée dans la mise en œuvre la plus avancée des chargeurs sans fil pour les véhicules électriques [19].

1.9.7.2 Inconvénients

- Efficacité énergétique relativement faible par rapport à la charge filaire.
- Limitations de distance et de puissance de transmission en fonction des topologies de charge.
- Coûts d'installation et d'achat plus élevés pour les systèmes de recharge sans fil.
- Interférences électromagnétiques potentielles avec d'autres équipements électroniques.
- Possibilité de perturbations du champ magnétique environnant [37].

1.10 CONCLUSION

En conclusion, les véhicules électriques ont parcouru un long chemin depuis leur invention, avec des améliorations constantes des batteries, des moteurs électriques et des systèmes de transmission. Ils offrent de nombreux avantages tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles et la diminution des coûts de fonctionnement.

Cependant, la recharge des batteries reste l'un des principaux défis de l'adoption généralisée des véhicules électriques, car elle nécessite souvent des temps de charge plus longs que le ravitaillement en carburant traditionnel. C'est là que le système de recharge sans fil pour les véhicules électriques peut offrir une solution pratique. La technologie de recharge

sans fil (TPSF) a connu une évolution rapide au cours des dernières années, offrant désormais des taux de transfert d'énergie plus élevés et des distances de transmission plus grandes

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue d'ensemble des véhicules électriques et de leurs principaux composants, en mettant l'accent sur les différents types de moteurs électriques, les convertisseurs statiques, la transmission, les connecteurs, les batteries et les modes de charge des véhicules électriques. Nous avons également abordé le système de recharge sans fil pour les véhicules électriques, son histoire, les méthodes de transfert d'énergie sans fil et les avantages et inconvénients de cette technologie. Enfin, nous avons examiné les différents types de véhicules électriques, les niveaux et les modes de charge, ainsi que la sécurité des voitures électriques. Dans l'ensemble, ce chapitre a fourni une base solide pour comprendre le fonctionnement des véhicules électriques et les différents éléments qui contribuent à leur efficacité et leur fiabilité.

Le prochain chapitre sera dédié à la modélisation de notre système de recharge sans fil utilisant deux bobines réceptrices. Nous allons explorer les différents modèles mathématiques et les méthodes de simulation utilisées pour évaluer les performances du système de recharge sans fil.

CHAPITRE 2

Modélisation Du Système De Recharge Sans Fil

2 INTRODUCTION

La modélisation est un outil indispensable pour étudier et comprendre le comportement d'un système complexe tel que le système de recharge sans fil à deux bobines réceptrices pour les véhicules électriques (VE). En utilisant des équations mathématiques et des méthodes numériques, nous pouvons simuler le fonctionnement du système de recharge sans fil à deux bobines réceptrices, afin d'analyser ses performances et de prédire son comportement sous différentes conditions.

2.1 Modèle statique du système de charge sans fil

Le modèle statique est détaillé dans les sous-sections suivantes, afin de décrire le modèle mathématique de chaque partie.[42]

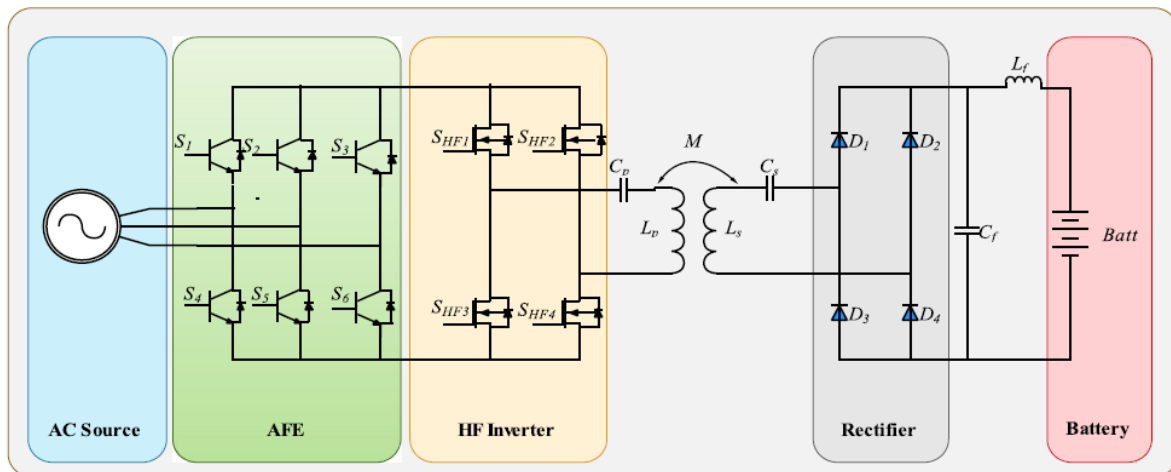


Figure 2.1: Structure du système de transfert de puissance inductif.

Comme le système VE est l'application principale de cette étude, l'architecture intérieure du système de recharge sans fil est connectée à la batterie, comme le montre la figure 2.1, où les composants électroniques comprennent un convertisseur AFE fournissant le bus continu à un onduleur haute fréquence. Il est connecté à la bobine par l'intermédiaire de la topologie de compensation SS. D'après les explications précédentes sur les topologies de compensation, le modèle SS est sélectionné. Ainsi, le modèle correspondant est donné en prenant en considération tous les paramètres tels que les résistances, les inductances et l'inductance mutuelle. La conception de la topologie sélectionnée est illustrée à la figure 2.

Tout d'abord, $L_a = L_p - M$ e $L_b = L_s - M$, où L_a et L_b désignent les inductances de fuite des enroulements primaire et secondaire. Les inductances de fuite des enroulements primaire et secondaire, respectivement. [42]

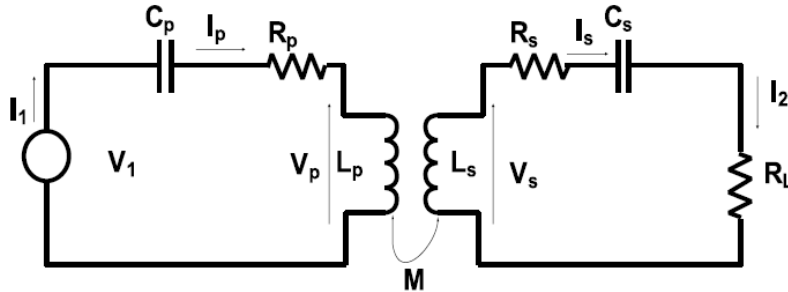


Figure 2.2: La topologie de compensation basée sur le SS avec une charge RL.

Dans ce modèle, la tension primaire de la bobine est désignée par V_p , qui est obtenue à partir d'une source de tension sinusoïdale désignée par V_1 . Ici, R_L représente une charge résistive en série utilisée pour obtenir l'expression finale de la valeur de rendement global, les tensions induites et secondaires sont décrites en fonction de l'inductance mutuelle M , de la fréquence angulaire et des courants primaire et secondaire I_p et I_s . Le coefficient de couplage magnétique est lié à l'inductance mutuelle, comme dans l'équation (1). L'impédance réactive Z_r entre le secondaire et le primaire peut être calculée comme dans l'équation (2), où Z_s est l'impédance du système secondaire, qui est déterminée par la topologie de compensation choisie [43].

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (1)$$

$$Z_s = \frac{\omega^2 M^2}{Z_r} \quad (2)$$

Le courant traversant l'enroulement secondaire est défini dans l'équation (3). Par conséquent, les tensions aux bornes des enroulements primaire et secondaire sont données par l'équation (4).

$$I_s = \frac{j\omega M I_p}{Z_s} \quad (3)$$

$$\begin{cases} V_p = j\omega L_p I_p - j\omega M I_s \\ V_s = j\omega M I_p - j\omega L_s I_s \end{cases} \quad (4)$$

Les fréquences primaires et secondaires sont les mêmes que celles calculées dans l'équation (5). Les niveaux de puissance primaire et secondaire sont définis par l'équation (6).

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C_S L_S}} = \frac{1}{\sqrt{C_P L_P}} = 2\pi f \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{C_S L_S}} = \frac{1}{\sqrt{C_P L_P}} = 2\pi f \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{C_S L_S}} = \frac{1}{\sqrt{C_P L_P}} = 2\pi f$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C_S L_S}} = \frac{1}{\sqrt{C_P L_P}} = 2\pi f \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_P = V_P I_P \\ P_S = V_S I_S \end{cases} \quad (6)$$

Avec les systèmes de recharge sans fil, tous les récepteurs (bobine et condensateur) sont généralement conçus de la même manière, l'impédance totale détectée par tous les capteurs (bobine et condensateur) est représenté par l'équation (7). Le nombre de bobines réceptrices est noté η . Le coefficient de couplage équivalent et l'inductance mutuelle sont alors déterminés par les équations (8) et (9) [44-45].

$$\sum_{i=1}^n Z_{ri} = n \frac{\omega^2 M^2}{Z_S} \quad (7)$$

$$\begin{cases} K_n = k\sqrt{n} \\ 0 \leq K \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$M_n = M\sqrt{n} \quad (9)$$

Le tableau 2.1 indique également la résistance et la réactance reproduites estimées à partir de l'équation (2) à la fréquence de résonance secondaire, qui dépend des compensations utilisées [43].

Tableau 2.1: Paramètres de l'impédance secondaire

Paramètres	Séries	Parallèles
Impédance Secondaire Z_s	$j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R$	$j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + \frac{1}{R}$
Courant de charge I_L	I_s	V_s / R
Tension de charge V_L	$I_s R$	V_s
Réactance	0	$-\frac{\omega_0 M}{L_s}$
Résistance	$\frac{\omega^2 M^2}{R}$	$\frac{RM}{L_s^2}$

Facteur de Qualité Qs	$\frac{\omega_0 L_s}{R}$	$\frac{R}{\omega_0 L_s}$
-----------------------	--------------------------	--------------------------

Les inductances propres et mutuelles (L1, L2, M) sont calculées pour différentes valeurs des paramètres d et sh. Ces inductances sont calculées par des intégrales de volume dérivées de l'expression de l'énergie magnétique. Nous désignons par A_φ la composante mutuelle du potentiel vectoriel magnétique dans la coordonnée cylindrique associé à la bobine [46].

Nous supposons que les bobines ont les caractéristiques suivantes :

- le nombre de tours des bobines est de (n_1, n_2)
- les rayons extérieurs sont (r_1, r_2)
- leurs axes verticaux sont parallèles (pour simplifier)
- les ferrites sont considérées comme linéaires et non saturées.

$$L_1 = \Re \left\{ \iiint_{v_1} \frac{n_1 A_\varphi}{I_1 S_1} \partial v \right\} \text{ quand } i_2=0 \quad (10)$$

$$L_2 = \Re \left\{ \iiint_{v_2} \frac{n_2 A_\varphi}{I_2 S_2} \partial v \right\} \text{ quand } i_1=0 \quad (11)$$

$$M = \Re \left\{ \iiint_{v_{1,i2}} \frac{n_2 A_\varphi}{I_1 S_2} \partial v \right\} = \left\{ \iiint_{v_{2,i1}} \frac{n_1 A_\varphi}{I_2 S_1} \partial v \right\} \quad (12)$$

Où S_1, S_2 sont les sections transversales des bobines, n_1, n_2 le nombre de tours de chaque bobine et v_1, v_2 sont les volumes des bobines. La notation \Re représente la valeur réelle, et les courants imposés (ou les densités de courant) dans la simulation.

Il s'agit de prototypes Renault. Nous avons l'influence de deux paramètres géométriques sur les paramètres électriques : la distance entre les bobines (ou l'entrefer) et le décalage de l'axe entre les centres des bobines ; d et sh respectivement, Les bobines sont constituées de fils de Litz isolés, et la fréquence de fonctionnement est de 30 kHz. Le tableau 2.3 présente les paramètres qui définissent le prototype Renault.[46]

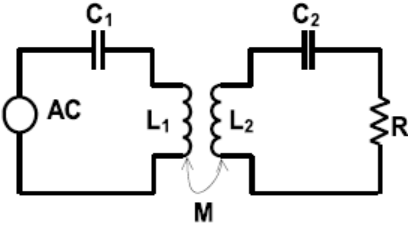
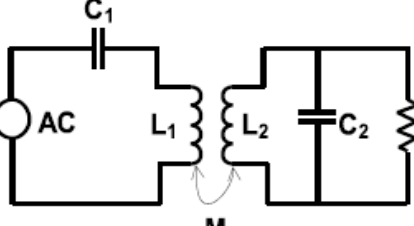
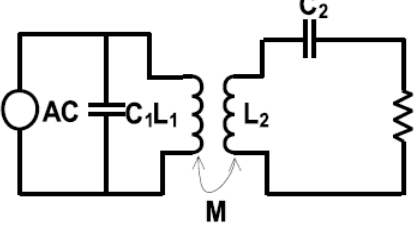
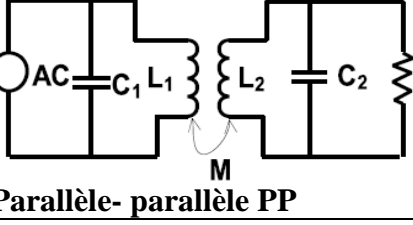
Tableau 2.2: Paramètres (Prototype Renault)

	Type	Paramètres	Valeurs
Primaire	Ferrite (N27)	Largeur	10 mm
		Diamètre	550 mm
	Bobine	Nombre de Tours	20
		Section transversale	855 mm ²
		Diamètre extérieur	500 mm
Secondaire	Ferrite (N27)	Largeur	5 mm
		Diamètre	550 mm
	Bobine	Nombre de Tours	20
		Section transversale	855 mm ²
		Diamètre extérieur	500 mm
	Bordure	Largeur	5 mm
		Longueur&Profondeur	1.6×1.6 m ²

2.2 Modélisation du Système de compensation

Dans les systèmes WPT, quatre topologies de circuits résonnants peuvent être utilisées, les topologies peuvent être décrites comme suit : Série-Série (SS), Série-Parallèle (SP), série-parallèle (PS) et parallèle-parallèle (PP). Ces conceptions sont illustrées dans le tableau suivant Les inductances et les condensateurs (C1, C2) sont déterminés pour annuler la partie réactive de la puissance transférée. Les circuits primaire et secondaire (L, C) du coupleur sont utilisés pour améliorer les transferts et minimiser la puissance apparente du coupleur [47-52].

Tableau 2.3: Paramètre des Topologies de compensation.

Topologies	Capacité primaire	Capacité Secondaire	Charge
 <p>Série- Série SS</p>	$\frac{1}{\omega^2 L_p}$	$\frac{1}{\omega^2 L_s}$	$\frac{\omega L_s}{Q_s}$
 <p>Série-parallèle SP</p>	$\frac{1}{\omega^2 \left(L_p - \frac{M^2}{L_s} \right)}$	$\frac{1}{\omega^2 L_s}$	$\omega L_s Q_s$
 <p>Parallèle-Série PS</p>	$\frac{1}{\omega^2 \left(L_p - \frac{\omega^2 M^4}{L_p R_{load}} \right)}$	$\frac{1}{\omega^2 L_s}$	$\frac{\omega L_s}{Q_s}$
 <p>Parallèle- parallèle PP</p>	$\omega^2 = \left(L_p - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{\frac{M^4}{L_s^4} R_{load}^2}{\omega^2 \left(L_p - \frac{M^2}{L_s} \right)}$	$\frac{1}{\omega^2 L_s}$	$\omega L_s Q_s$

2.2.1 Circuit topologique de compensation SS

Les condensateurs résonants C_1 et C_2 sont connectés en série pour accorder les inducteurs de fuite respectivement L_1 et L_2 , les fréquences de résonance primaire et secondaire sont donc les suivantes [46] :

$$f_{0,1} = 1 / 2\pi \sqrt{l_1 C_1} = 1 / 2\pi \sqrt{\left(L_1 - \frac{M}{m} \right) C_1} \tag{12}$$

$$f_{0,2} = 1/2\pi\sqrt{m_2 l_2 C_2} = 1/2\pi\sqrt{(L_2 - mM)C_2} \quad (13)$$

Où $m = \frac{n_2}{n_1}$ est le rapport de Transformation.

En fait, les SS_1 et SS_L présentent les mêmes calculs analytiques, à l'exception des valeurs des condensateurs de compensation C_1 et C_2 . Ainsi, toutes les équations dérivées précédemment pour SS_1 sont également valables pour SS_L . Pour le cas de référence, les valeurs des condensateurs résonnants (C_1 et C_2) sont calculées et fixées. Les valeurs des condensateurs résonnants sont donc trouvées pour une fréquence de conception [45]:

$$f_{0,ref} = 30kHz = f_{0,1,ref} = f_{0,2,ref}$$

$$C_1 = 1/\left(\left(2\pi f_{0,1,ref}\right)^2 l_{1,ref}\right) \quad (14)$$

$$C_2 = 1/\left(\left(2\pi f_{0,2,ref}\right)^2 m^2 l_{2,ref}\right) \quad (15)$$

2.2.2 Compensation des inductances SP

Les valeurs des fréquences de résonance primaire et secondaire pour la compensation sont donc les suivantes [46] :

$$f_{0,1} = \frac{1}{\sqrt{\left(l_1 + \frac{l_2 l_3}{l_2 l_3}\right) C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\left(L_1 - \frac{M^2}{L_2}\right) C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1-k^2)L_1 C_1}} \quad (16)$$

$$f_{0,2} = 1/2\pi\sqrt{m^2(l_2 + l_3)C_2} = 1/2\pi\sqrt{L_2 C_2} \quad (17)$$

$$C_1 = 1/\left(\left(2\pi f_{0,1,ref}\right)^2 l_{1,ref}\right) \quad (18)$$

$$C_2 = 1/\left(\left(2\pi f_{0,2,ref}\right)^2 m^2 l_{2,ref}\right) \quad (19)$$

2.3 Modélisation de la batterie du VE

La batterie est modélisée pour montrer l'efficacité de l'outil de recharge sans fil et pour analyser le flux d'énergie. La conception principale de cet élément est illustrée à la figure 3, qui présente une source de tension continue et une résistance variable en série qui dépend de plusieurs facteurs. Comme indiqué dans l'Eq (20), dans laquelle la tension de charge/décharge de la batterie lithium-ion est décrite [42].

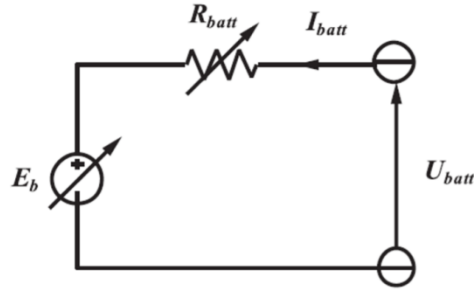


Figure 2.3: Circuit équivalent de la batterie lithium-ion

$$U_{bat} = \begin{cases} U_{batt-charge} = E_b + R_{batt}I_{batt} \\ U_{batt-discharge} = E_b - R_{batt}I_{batt} \end{cases} \quad (20)$$

La capacité restante de la batterie $Q(t)$ est donnée comme suit :

$$Q(t) = Q(0) - \int_0^t (\eta_{batt} I_{batt}) dt \quad (21)$$

Où η_{batt} désigne les performances de la batterie, t est le temps de décharge, et I_{batt} est le courant de la batterie. L'état de charge SOC peut être écrit comme suit :

$$SOC(\%) = \left(\frac{Q(t)}{Q_{max}} \right) 100 \quad (22)$$

Où Q_{max} désigne la capacité maximale. La tension de charge et de décharge de la batterie (E_b) est une fonction des composants internes de la batterie, et est donnée comme suit :

$$E_b = \begin{cases} E_0 - K_b \left(\frac{Q}{Q-it} \right) i^* - K_b \left(\frac{Q}{Q-it} \right) it + Ae^{(-B.it)}, \rightarrow \text{décharge}, i^* > 0 \\ E_0 - K_b \left(\frac{Q}{0.1Q-it} \right) i^* - k_b \left(\frac{Q}{Q-it} \right) it + Ae^{(-B.it)}, \rightarrow \text{charge}, i^* < 0 \end{cases} \quad (23)$$

Où E_0 désigne la tension constante, K_b désigne la résistance de polarisation, i^* désigne la dynamique du courant à basse fréquence, it représente la capacité extraite, A représente la tension exponentielle, et B représente la capacité exponentielle [42].

2.4 Modélisation du Redresseur

La tension continue (DC) aux bornes de la charge est la valeur moyenne sur la période T de la tension de sortie du redresseur [43] :

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt \quad (24)$$

De manière similaire, il est possible de définir la tension efficace (r.m.s.) aux bornes de la charge :

$$V_L = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_L^2(t) dt} \quad (25)$$

Le rapport entre les deux tensions est le facteur de forme (FF) :

$$FF = \frac{V_L}{V_{dc}} \quad (26)$$

Ce paramètre est assez important car il est un indice de l'efficacité du processus de redressement.

Ayant supposé que la charge soit purement résistive, il est possible de définir les courants comme suit :

$$I_L(t) = \frac{V_L(t)}{R_L} \quad (27)$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R_L} \quad (28)$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} \quad (29)$$

Le taux de redressement (η), également connu sous le nom d'efficacité de redressement, est exprimé par :

$$\eta = \frac{V_{dc}^2}{V_L^2} = \frac{1}{FF^2} \quad (30)$$

Ou :

$$P_{dc} = I_{dc} V_{dc} \quad (31)$$

$$P_L = I_L V_L \quad (32)$$

$$P_D = R_D I_L^2 \quad (33)$$

Le redresseur en pont est considéré comme la meilleure configuration pour le redressement monophasé

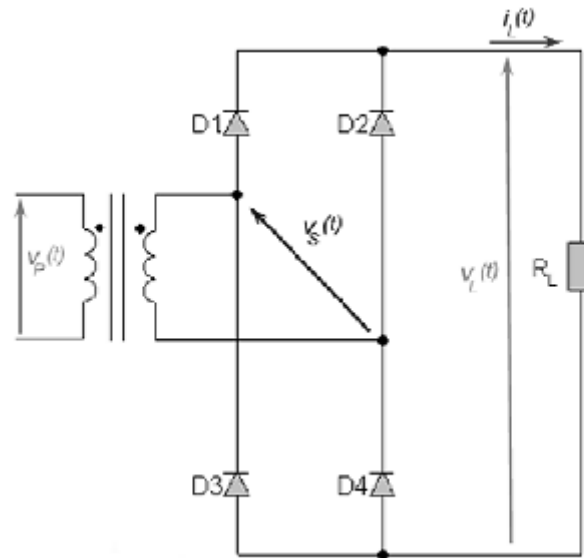


Figure 2.4: Structure du redresseur en pont monophasé.

Le facteur de crête (RF) est un autre paramètre important utilisé pour décrire la qualité du redressement, défini comme le rapport de la composante alternative efficace de la tension de la charge par rapport à la tension continue :

$$RF = \frac{\sqrt{V_L^2 - V_{dc}^2}}{V_{dc}} = \sqrt{FF^2 - 1} \quad (34)$$

2.5 Modélisation de l'onduleur Haute Fréquence

L'onduleur est essentiel pour créer un champ magnétique à haute fréquence. Les dispositifs à semi-conducteurs utilisés dans ce convertisseur AC/DC doivent fonctionner à des fréquences élevées.

Dans un système de transmission d'énergie sans fil, l'onduleur peut générer un signal non sinusoïdal, contrairement aux onduleurs connectés au réseau électrique, la valeur de la tension produite par l'onduleur peut être modifiée en fonction des besoins spécifiques de la charge électrique connectée à celui-ci, Cela offre plusieurs avantages en termes de réduction de la complexité, des coûts et du poids du système dans son ensemble [44].

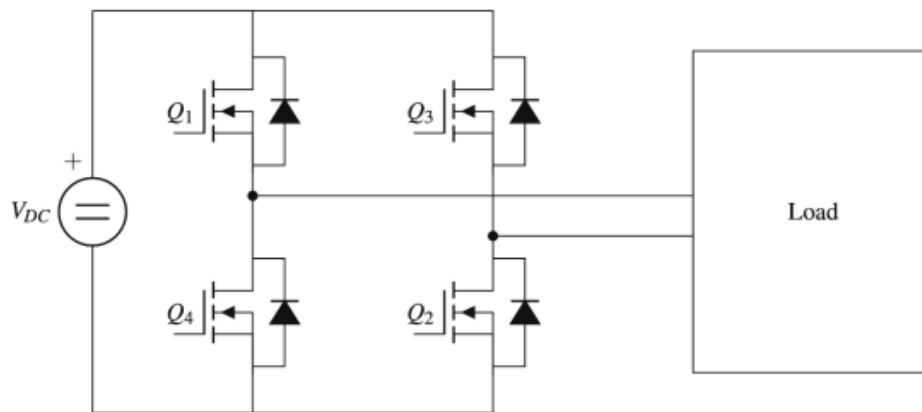


Figure 2.5 : Topologie de l'onduleur haute fréquence avec des IGBT

La tension de sortie est exprimée comme suit :

$$V_{out} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_{input}}{n\pi} \sin(n\pi D) \sin(n\omega t) \quad (35)$$

La tension de sortie dépend de la paire active de transistors. On peut avoir deux états : lorsque Q2 et Q1 sont activés, la tension de sortie est positive (VDC), tandis que lorsque Q4 et Q3 sont activés, la tension de sortie est négative (-VDC). Le contrôle de l'onduleur peut se faire par une approche à onde carrée ou par déphasage, permettant d'obtenir différentes tensions de sortie (VDC, -VDC et 0). Le choix du contrôle dépend des besoins spécifiques du système.

2.6 Conclusion

En conclusion, la modélisation mathématique du système de recharge sans fil à deux bobines réceptrices est un outil puissant pour comprendre et analyser le comportement de ce type de système. En utilisant des équations et des modèles mathématiques, on peut étudier les caractéristiques électromagnétiques, les pertes de puissance, l'efficacité de transfert d'énergie et d'autres paramètres clés. Elle offre un moyen de prédire et d'évaluer l'effet de différents paramètres de contrôle sur les performances du système, permettant ainsi de développer des algorithmes de contrôle adaptés.

CHAPITRE 3

Simulations et Analyse des performances du système de recharge sans fil

3 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons explorer la simulation du système de recharge sans fil à deux bobines réceptrices pour les véhicules électriques en utilisant MATLAB. La simulation nous permettra d'analyser les performances du système en termes de puissance transmise, de temps de recharge de la batterie et d'efficacité énergétique, tout en optimisant les paramètres clés du système qui consiste différentes configurations de systèmes de recharge sans fil : une ou deux bobines réceptrices. Nous allons également étudier les différents types de topologies de systèmes de transmission d'énergie sans fil, notamment la topologie série-série et la topologie série-parallèle.

3.1 Model de système de recharge sans fil

Dans le cadre d'étude de système de recharge sans fil pour les véhicules électriques, nous avons choisi d'implémenter une solution de recharge statique, elle permet de recharger le véhicule lorsqu'il est en état d'arrêt. Cette méthode repose sur l'utilisation des bobines émettrices et réceptrices dont les premières (émettrices) sont installées dans le sol et les autres (réceptrices) sont placées sous le véhicule électrique. Le fonctionnement de ce système de recharge est basé sur la création d'un champ magnétique alternatif dans les bobines émettrices qui induit une tension alternative dans la deuxième bobine. Cette tension est ensuite convertie en continu pour recharger la batterie du véhicule électrique comme le montre la figure 3.1.

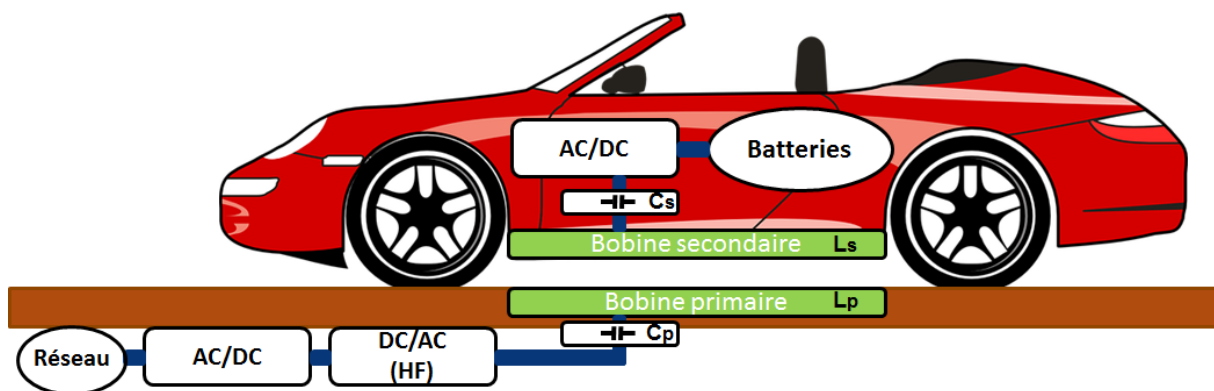


Figure 3.1: Model de Système de recharge sans fil avec une seule bobine.

Cette simulation présentée sur la figure 3.2, les principaux paramètres qui ont été pris en compte comprennent la configuration du système de bobines (une seule bobine réceptrice ou deux bobines réceptrices), les valeurs d'inductance mutuelle, les propriétés électriques des bobines, la distance entre les bobines, les caractéristiques de la batterie et les paramètres de la source.

Le système de recharge sans fil est alimenté par le réseau électrique, en utilisant une source monophasée de 220V/50Hz

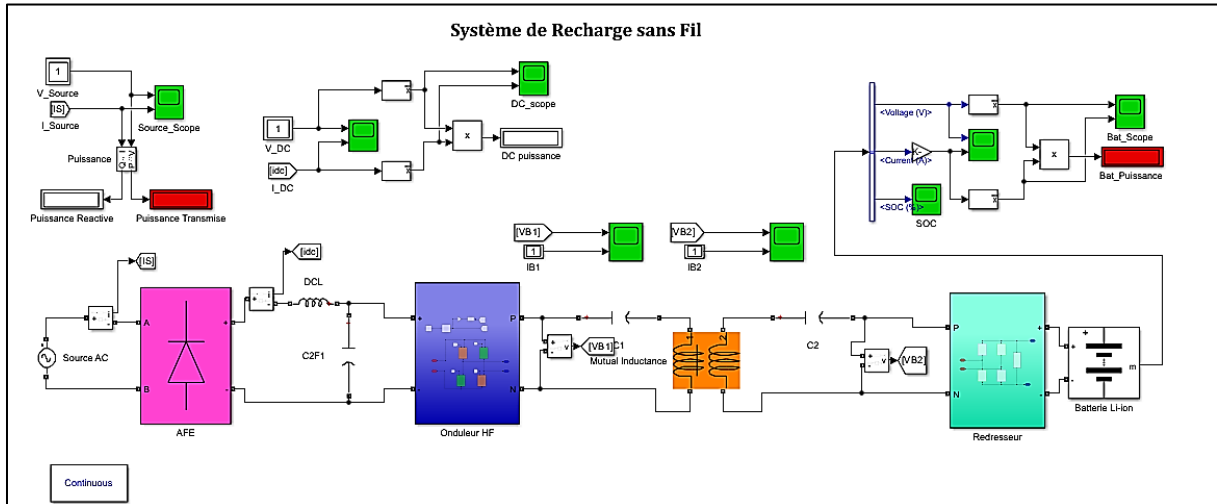


Figure 3.2: Vue d'ensemble du système de recharge sans fil

La figure 3.3 montre le circuit du AF (pont universel) qui vise à transformer la tension alternative d'entrée de 50 Hz en tension continue d'une valeur maximale de 220V, avec deux bras de pont de diodes, Résistance d'amortissement $R_s = 1e5$ ohms et une capacité négligée.

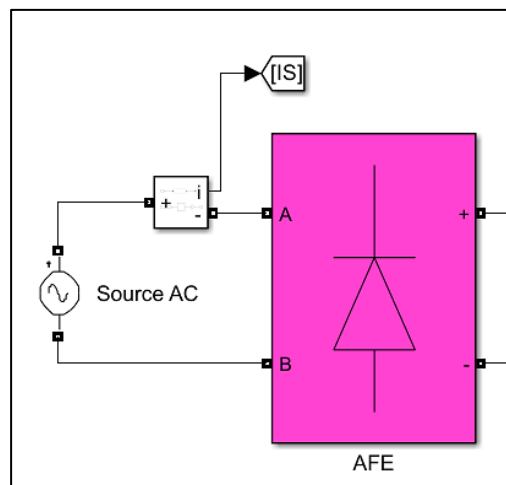


Figure 3.3: Bloc du AFE.

Le bloc convertisseur de haute fréquence illustré à la figure 3.4 contient 4 transistors IGBT commandés par MLI (modulation de largeur d'impulsion) afin d'obtenir un signal de sortie à la fréquence requise de 30 kHz (basée sur les approches de normalisation internationale déjà existantes dans la CEI, l'ISO).

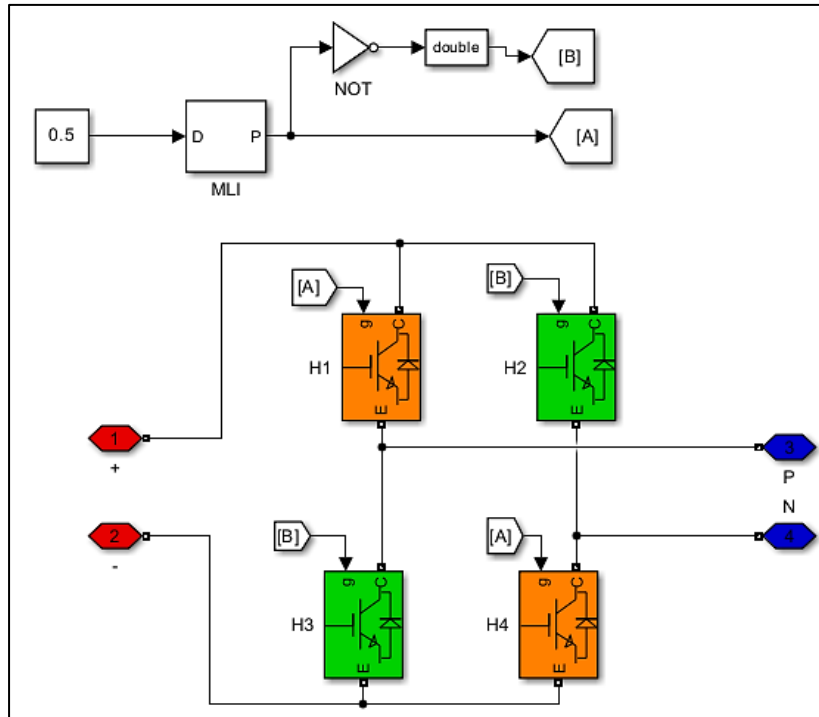


Figure 3.4: Onduleur de haute fréquence

Le signal alternatif de 30 kHz est envoyé à la bobine émettrice pour générer un champ magnétique qui traverse la deuxième bobine pour générer une tension dans le circuit de réception, tandis que la capacité est utilisée pour compenser la puissance réactive, afin d'augmenter le courant de l'alimentation sans fil la topologie de compensation utilisée dans ce système est SS (Série-Série).

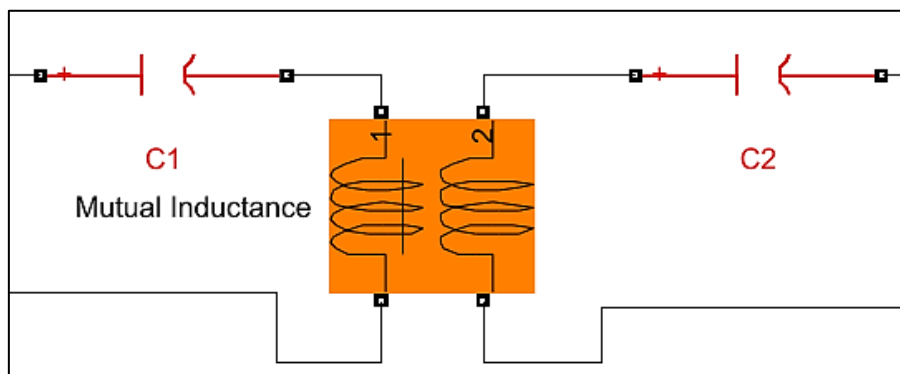


Figure 3.5: Circuit de couplage.

La partie réceptrice du circuit de couplage est située sur le bloc du véhicule électrique et contient les éléments suivants un redresseur pour transformer le signal électrique AC 30 kHz provenant de la station de charge en signal électrique CC pour charger la batterie du véhicule électrique, comme le montre la figure 3.6.

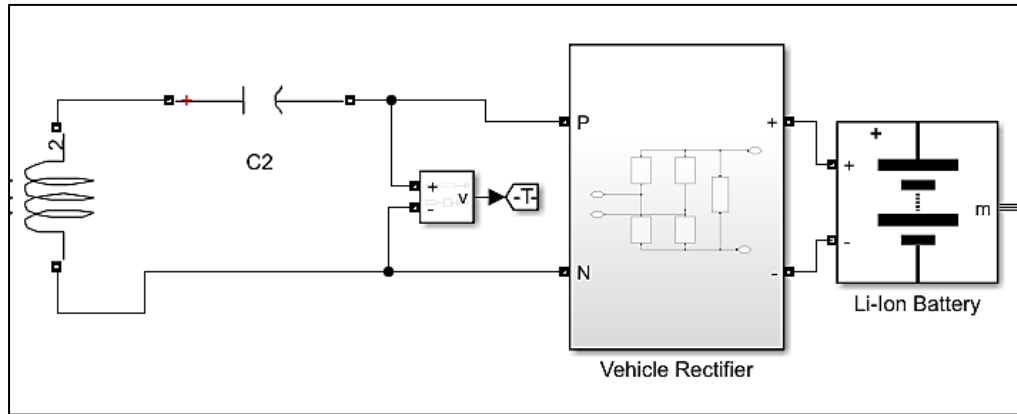


Figure 3.6: Bloc du redresseur du véhicule

Le bloc redresseur monophasé est un circuit qui contient 4 diodes, une capacité de filtrage pour minimiser les perturbations du redressement dues à un signal d'entrée à haute fréquence, comme le montre la figure 3.7.

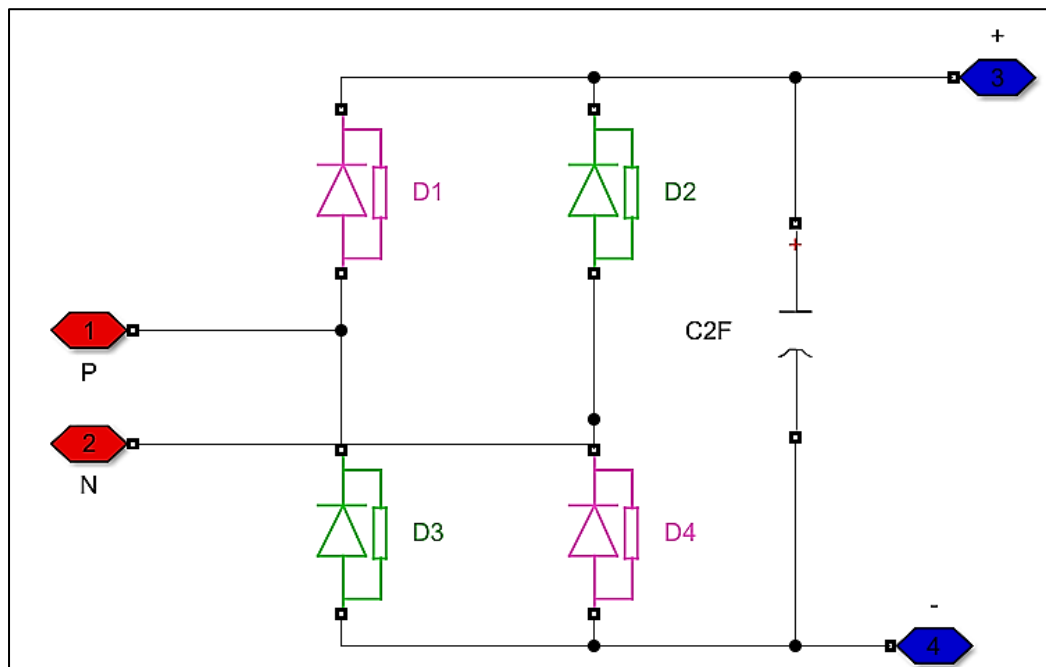


Figure 3.7: Bloc redresseur pour véhicule électrique

Le bloc redresseur est connecté au bloc batterie Lithium-ion illustré à la Figure 3.6, pour charger la batterie du véhicule électrique avec les paramètres qui sont indiqués à l'annexe.

3.2 Etude comparative des différentes configurations de systèmes de recharge sans fil

Nous allons comparer les performances de différentes configurations de systèmes de recharge sans fil en utilisant une seule bobine réceptrice et deux bobines réceptrices.

Cette étude comparative nous permettra de déterminer les avantages et les inconvénients de chaque configuration de système de recharge sans fil, ce qui pourrait aider à guider les futurs développements dans ce domaine en vue d'une adoption plus large des véhicules électriques.

3.2.1 Simulation du système de recharge sans fil à une seule bobine réceptrice utilisant la topologie SS

La simulation du système de recharge sans fil à une seule bobine réceptrice utilisant la topologie SS est montrée par la figure 3.2

La figure 3.8 présente la tension sinusoïdale monophasé du réseau, ce qui est prévu pour une alimentation électrique standard. Cependant, le courant alternatif est déformé, avec des variations par rapport à une forme d'onde sinusoïdale idéale avec une valeur maximale de **46.76 A**. Cette déformation du courant alternatif est due à la présence des harmoniques.

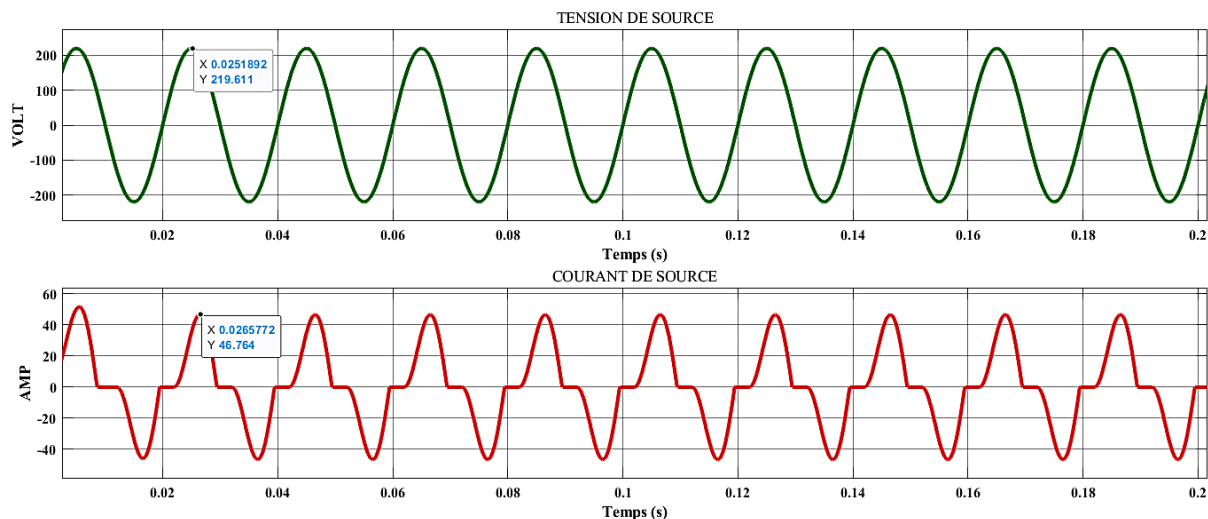


Figure 3.8: Tension et Courant de source

D'après la figure 3.9 nous observons une transformation significative de la tension et du courant. La tension sinusoïdale d'origine, avec une valeur maximale de **220 V**, est convertie en une tension continue, qui présente une valeur crête de **191 V** avant de se stabiliser à **180 V** approximativement.

En ce qui concerne le courant, nous constatons une évolution similaire. Le courant alternatif déformé, est converti en un courant continu avec une valeur crête de **21 A**, ce courant se stabilise ensuite à environ **19 A**.

Cette conversion témoigne de la capacité de l'AFE à gérer efficacement le courant et à minimiser les distorsions harmoniques. Cela contribue à une meilleure qualité de l'alimentation électrique et à une réduction des perturbations dans le système de recharge sans fil.

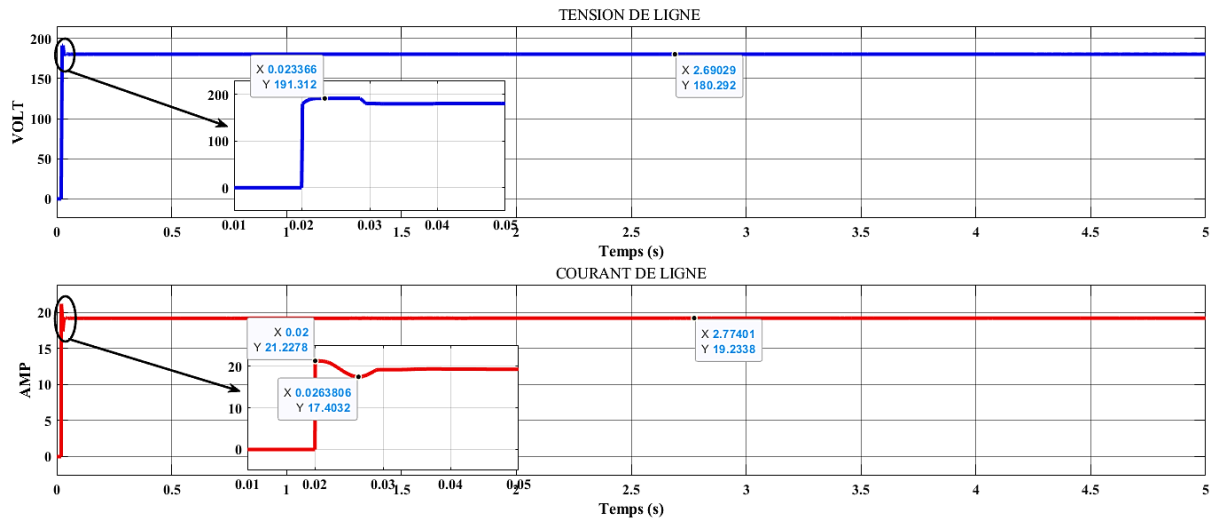


Figure 3.9: Tension et Courant de Ligne DC

La figure 3.10 montre la tension aux bornes de la bobine émettrice qui est un signal carré qui varie entre **301.73V** et **51.49 V**, le signal carré persiste et se maintient de manière continue.

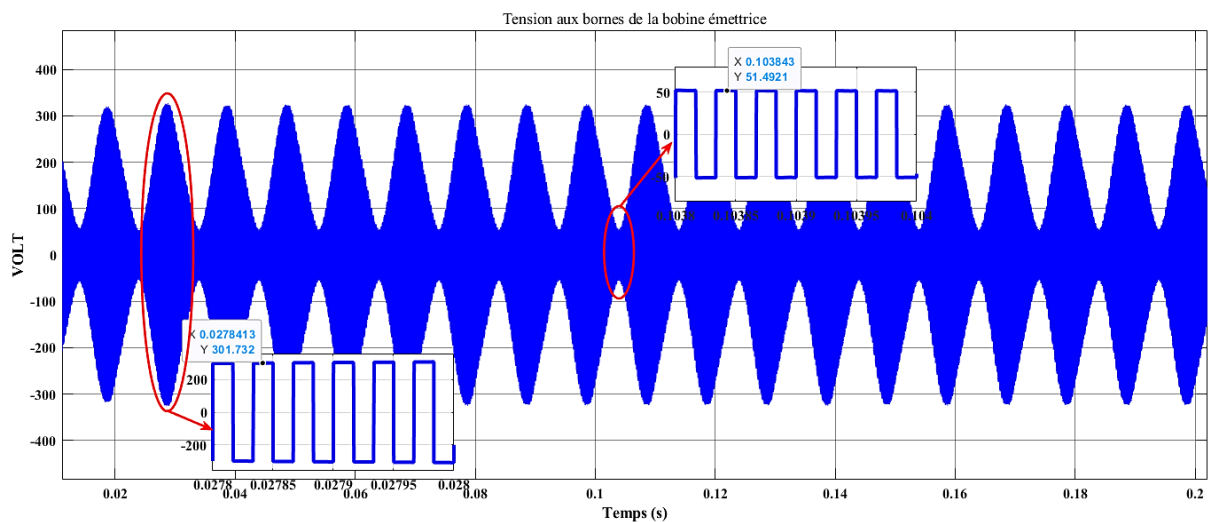


Figure 3.10: Tension aux bornes de la bobine émettrice

D'après la figure 3.11, nous constatons que le courant de la bobine émettrice un signal sinusoïdale qui une valeur initiale de **11.85 A** puis il augmente progressivement pour atteindre une valeur maximale stable de **21.54 A**.

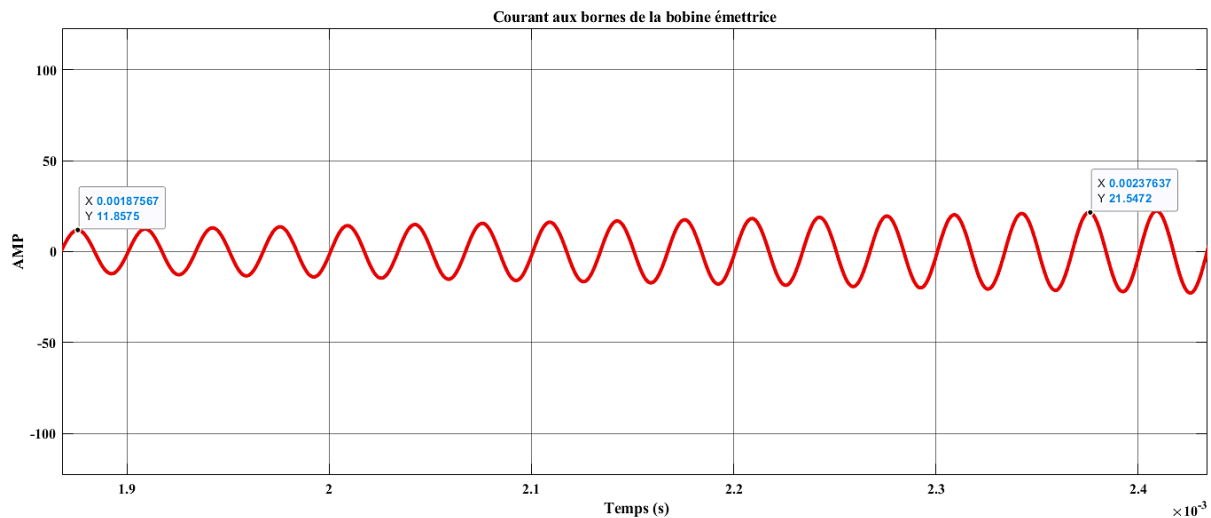


Figure 3.11: Courant aux bornes de la bobine émettrice

La figure 3.12 illustre la tension aux bornes de la bobine réceptrice initialement, c'est un signal sinusoïdale avec une valeur non stable de **122.83 V**, cependant cette caractéristique se transforme progressivement en un signal carré avec des valeurs maximales constantes de **389.37V**, ce changement peut être dû à une meilleure synchronisation entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice.

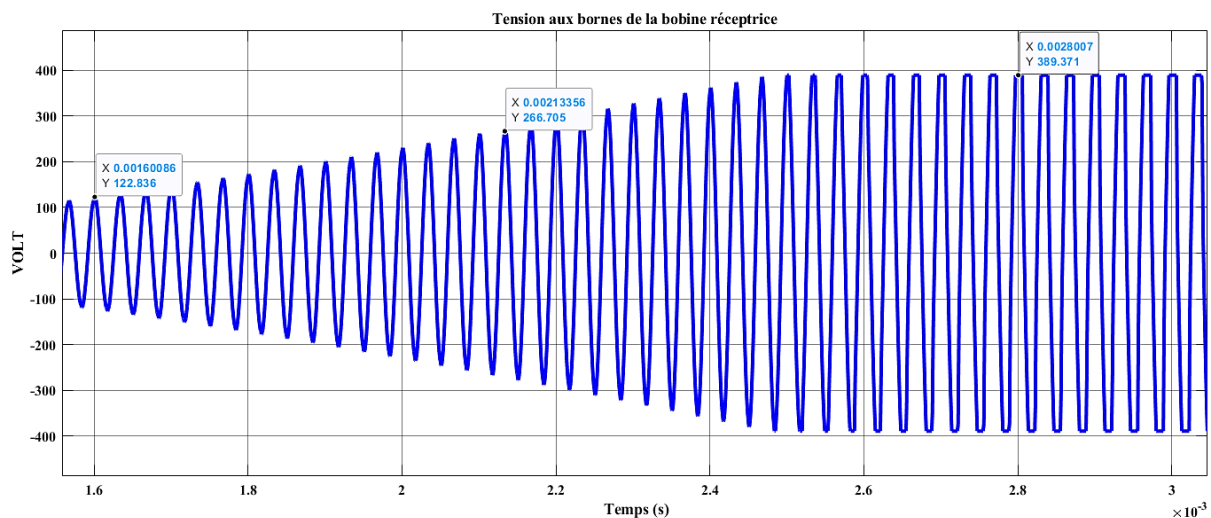


Figure 3.12: Tension aux bornes de la bobine réceptrice

Nous notons dans la figure 3.13 que le courant de la bobine réceptrice a un signal sinusoïdale avec une valeur crête de **24.85 A**, ensuite se courant se déforme et diminue à **4.9**

A. Cette variation du courant, passant d'une valeur élevée à une valeur plus basse, se répète périodiquement, tout au long de la simulation.

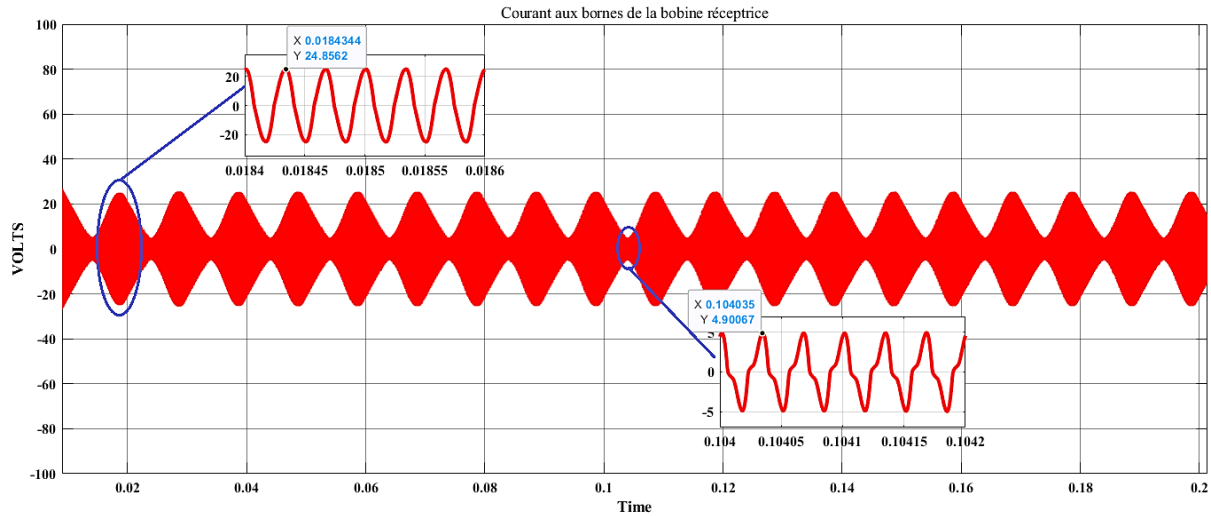


Figure 3.13: Courant aux bornes de la bobine réceptrice

La figure 3.14 montre que la tension de la batterie est continue d'une valeur crête de **388V**. Cette stabilité de tension est cruciale pour assurer un bon fonctionnement du système de recharge et garder une alimentation constante pour les véhicules électriques.

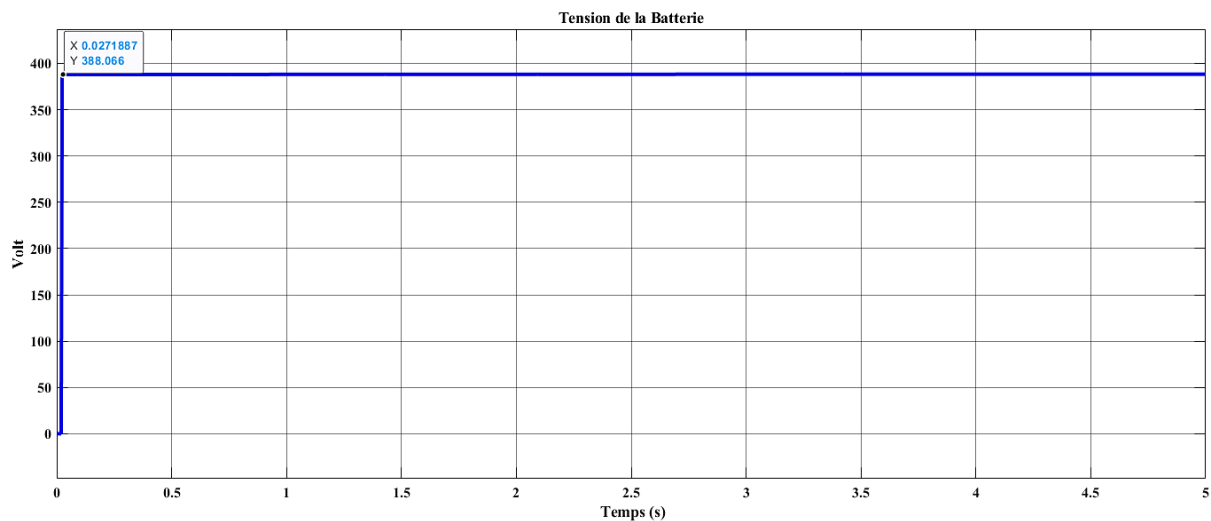


Figure 3.14: Tension de la Batterie

Le courant de la batterie de la figure 3.15 atteint une valeur max de **9.3A** avant une légère diminution et une stabilisation d'une valeur continue à **8.22 A**, nous constatons que le courant est relativement faible.

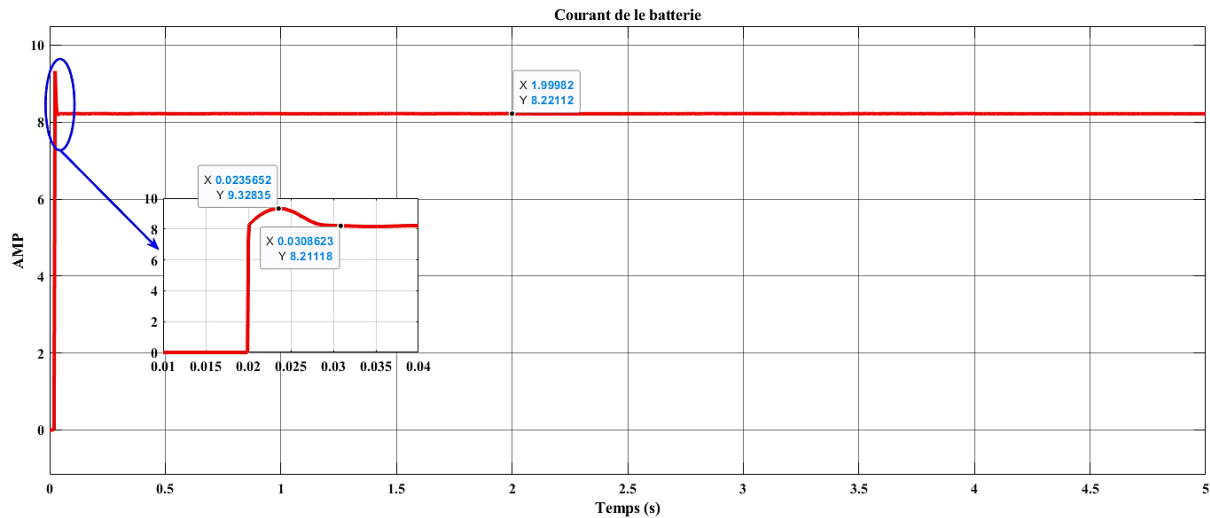


Figure 3.15: Courant de La batterie

La figure 3.16 illustre l'évolution de l'état de charge (SOC) de la batterie est observée pendant une période de 5 secondes, où le SOC passe de **50%** à **50.011%**. Cette augmentation est relativement lente, ce qui indique une charge progressive de la batterie.

En considérant la capacité de la batterie de **100Ah** et le courant de charge de **8.22A**, donc le temps de charge nécessaire pour atteindre 100% de la capacité est :

Temps de charge (en heures) = Capacité de la batterie (en Ah) / Courant de charge (en A),
 nous obtenons : Temps de charge = 100Ah / 8.22A = **12h 46min.**

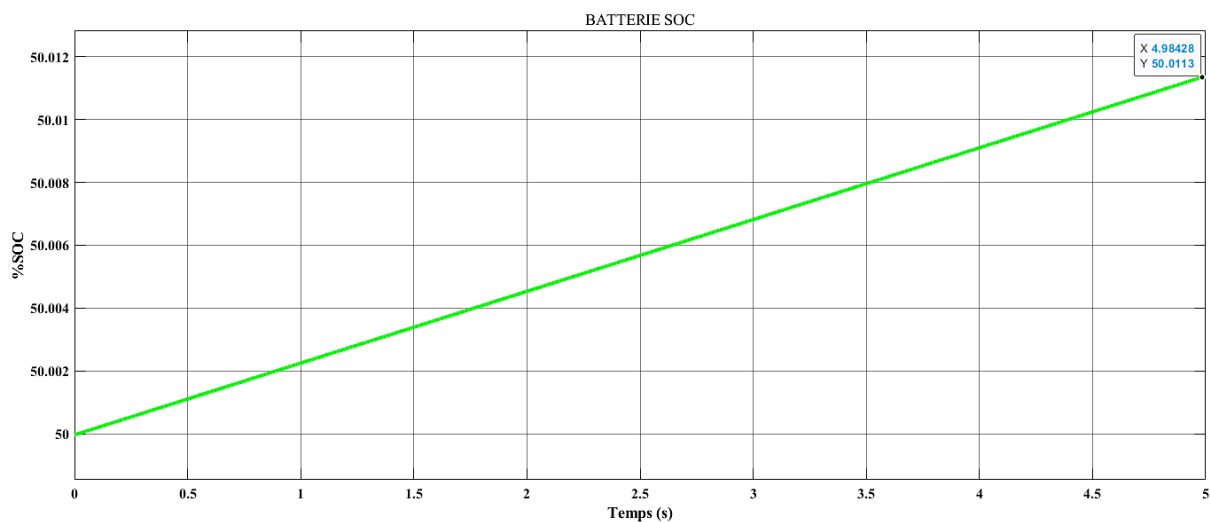


Figure 3.16: SOC de la batterie

D'après la figure 3.17 nous constatons que la puissance transmise atteint une valeur maximale de **3969W** avant de se stabiliser à **3503W**. Cette puissance transmise représente la quantité d'énergie électrique transférée de la source d'alimentation vers la bobine réceptrice.

Parallèlement, la puissance reçue par la batterie du véhicule électrique monte à **3617W** avant de se stabiliser à **3191W**. Cette puissance reçue indique la quantité d'énergie électrique reçue par la batterie pour la recharge.

L'efficacité du système peut être calculée en utilisant la formule :

$$\text{Efficacité (\%)} = (\text{Puissance reçue } P_b / \text{Puissance transmise } P_t) \times 100$$

Nous aboutissons à : Efficacité = (3191W / 3503W) x 100 ≈ **91.09%**

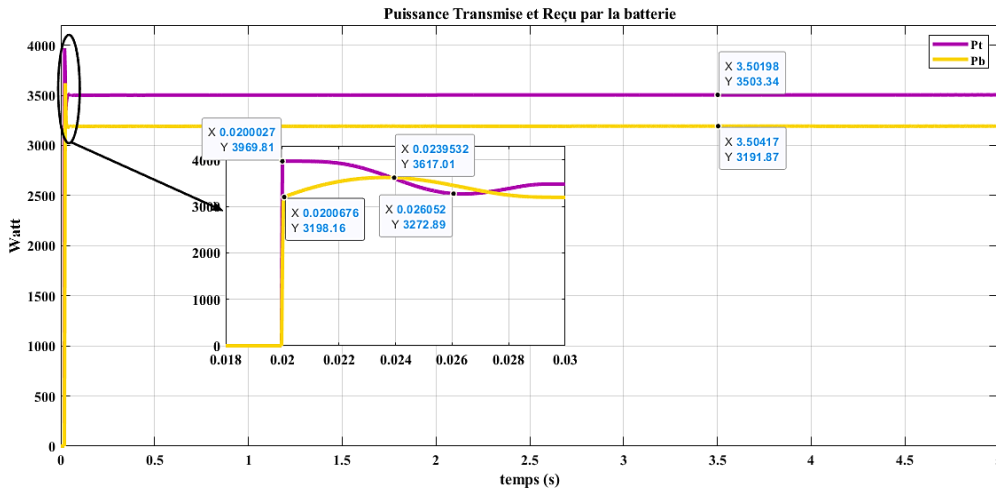


Figure 3.17: Puissance Transmise et Reçu par la batterie

3.2.2 Simulation du système de recharge sans fil à deux bobines réceptrices utilisant la topologie SS

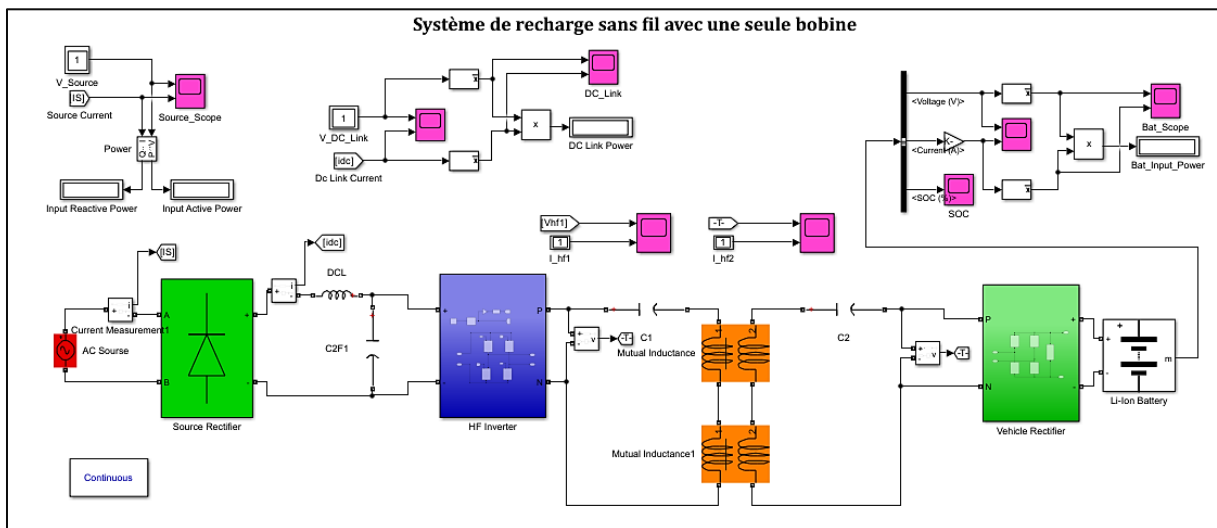


Figure 3.18: Vue d'ensemble du système de recharge sans fil avec deux bobines.

Sur la figure 3.19 la tension de la source d'alimentation est constante à **220V**, conformément à la valeur que nous avons attribuée. En ce qui concerne le courant alternatif, nous constatons des perturbations, avec une valeur maximale de **66A**.

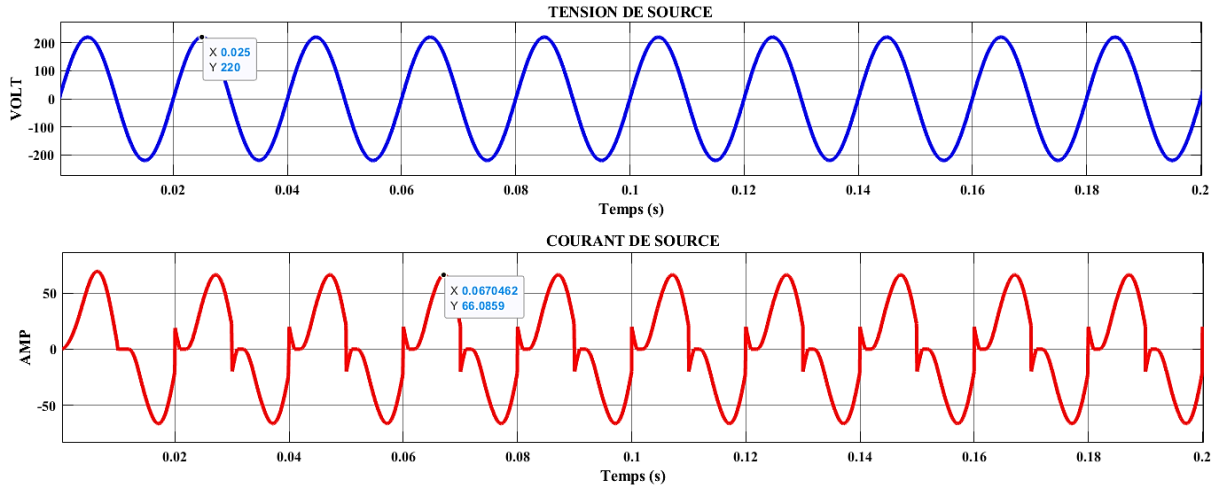


Figure 3.19: Tension et courant de source

Après le passage de l'AFE et d'après la figure 3.20 la tension alternative provenant de la source est convertie en tension continu elle atteint une valeur de **157V** avant de se stabiliser à **147V**. Nous remarquons aussi que le courant augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale de **34A**, puis diminue légèrement à **33A** et se stabilise par la suite.

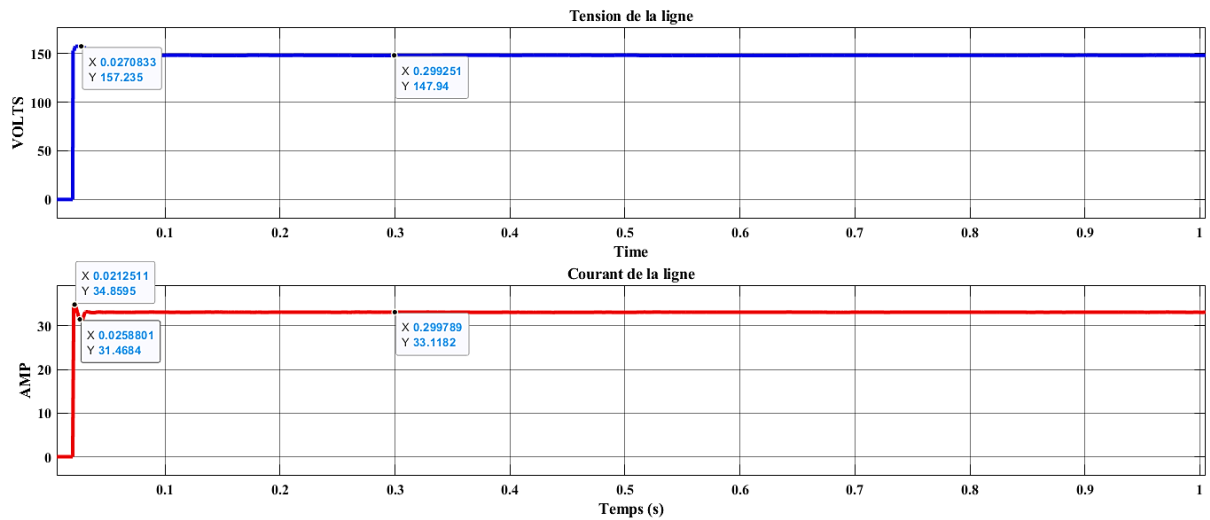


Figure 3.20: Tension et Courant DC de la Ligne

La tension aux bornes de la bobine émettrice est un signal carré, ce qui signifie qu'elle oscille alternativement entre deux valeurs, généralement une tension élevée et une tension basse. Dans ce cas, le signal carré atteint une valeur maximale de **279V**, puis s'atténue pour se limiter à une valeur très basse de **5.4V**. cette fluctuation de tension se répète et illustré par la figure 3.21.

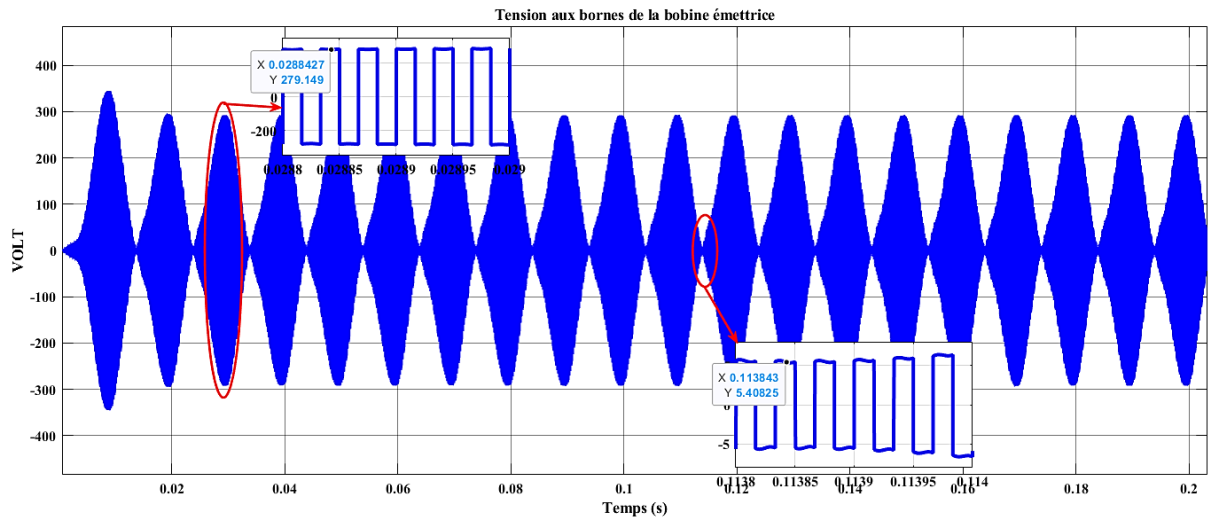


Figure 3.21: Tension aux bornes de la bobine émettrice

Le courant de la bobine émettrice présente une attitude alternative, il alterne entre une valeur maximale de **176A** et une valeur plus basse de **35A** comme le montre la figure 3.22.

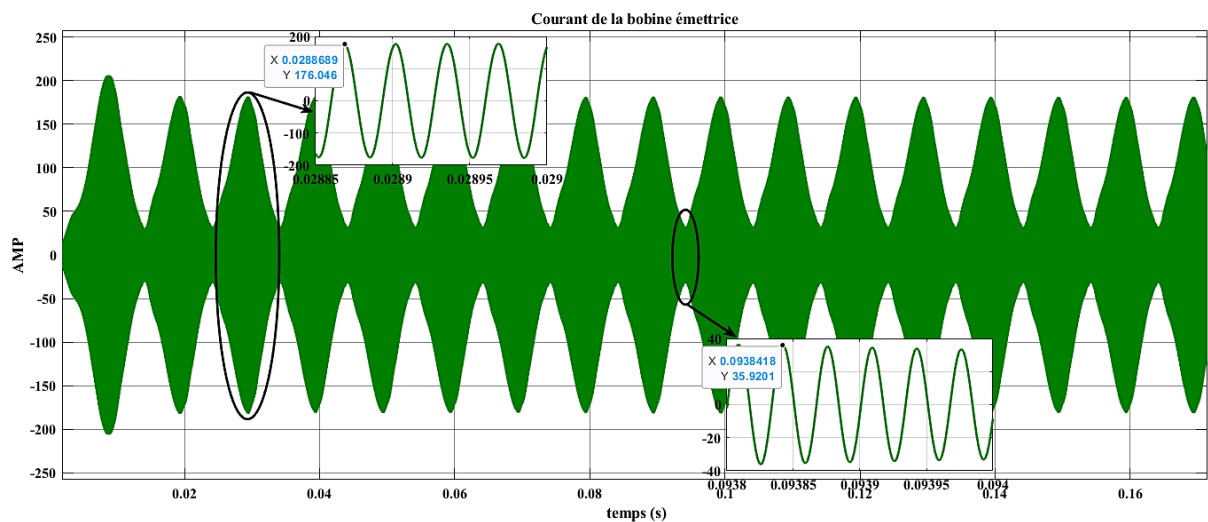


Figure 3.22: Courant aux bornes de la bobine émettrice

D'après la figure 3.23 la tension aux bornes de la bobine réceptrice est périodique et alternative, fluctuant entre deux formes distinctes : une forme carrée et une forme sinusoïdale. Dans la première période, la tension atteint une valeur maximale de **353.24 V** et prend une forme sinusoïdale. Ensuite, la tension passe à une forme carrée avec une valeur constante de **390.36 V** par la suite, la tension reprends sa forme primaire, cette conduite se répète de manière cyclique.

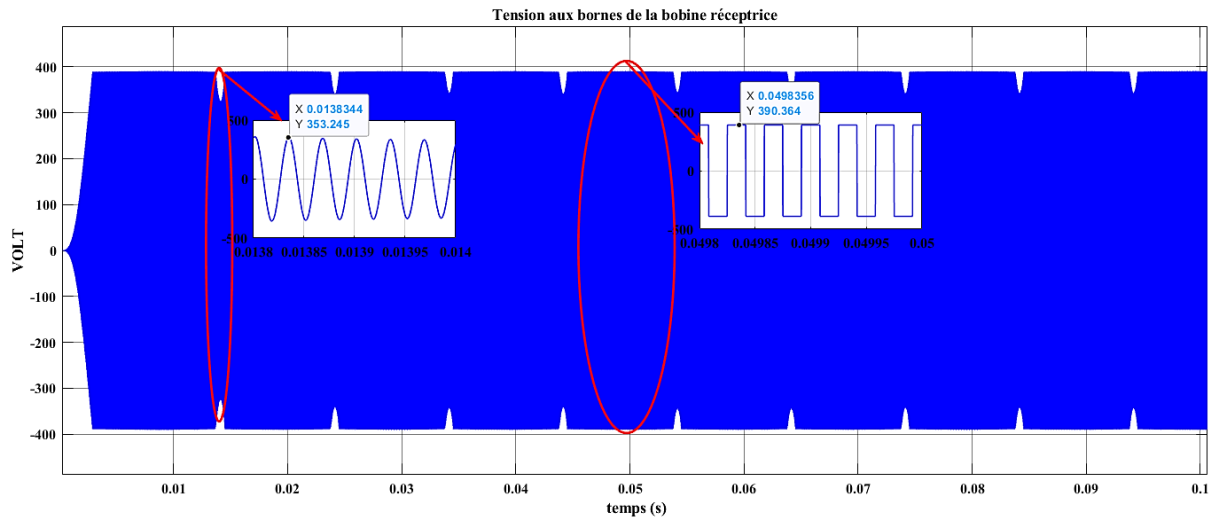


Figure 3.23: Tension aux bornes de la bobine réceptrice

Le courant de la bobine réceptrice montré à la figure 3.24 se manifeste d’une manière périodique et alternée, le courant franchi une valeur maximale de **36.54A** puis se réduit à une valeur minimale de **0.77A**.

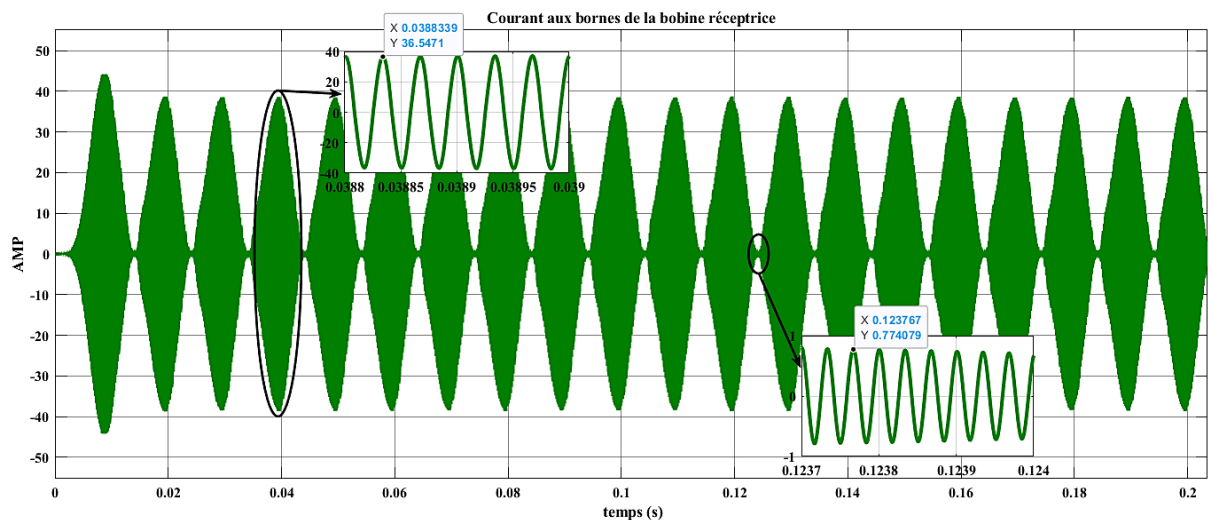


Figure 3.24: Courant aux bornes de la bobine réceptrice

Les figures 3.25 et 3.26 montrent respectivement la tension de la batterie qui est constante **388V** tout au long du processus de et un courant d’une valeur maximale de **12.99 A**, puis se décline légèrement à **11.49 A**.

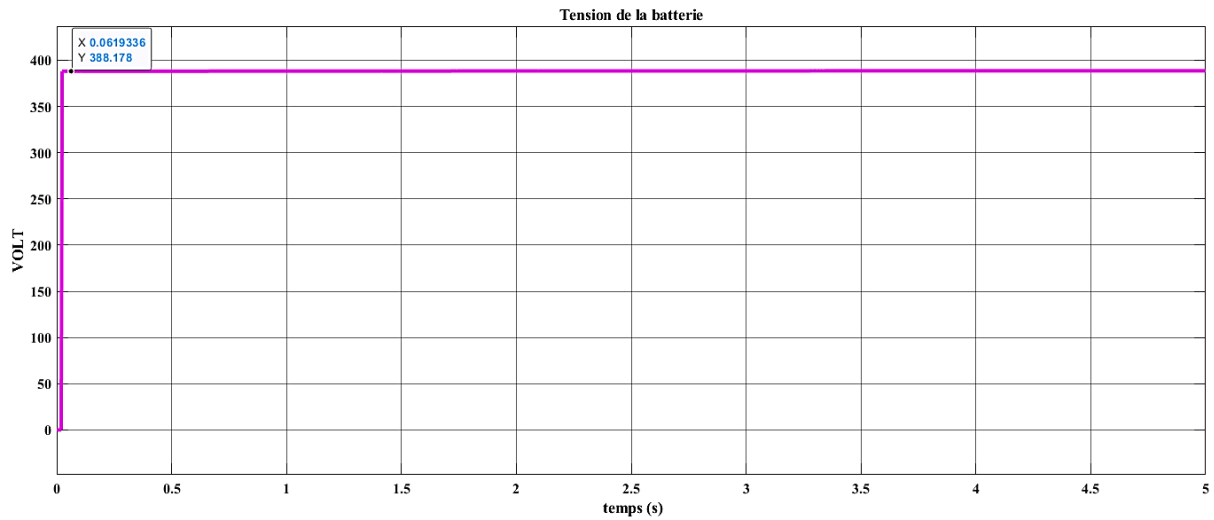


Figure 3.25: Tension de la batterie

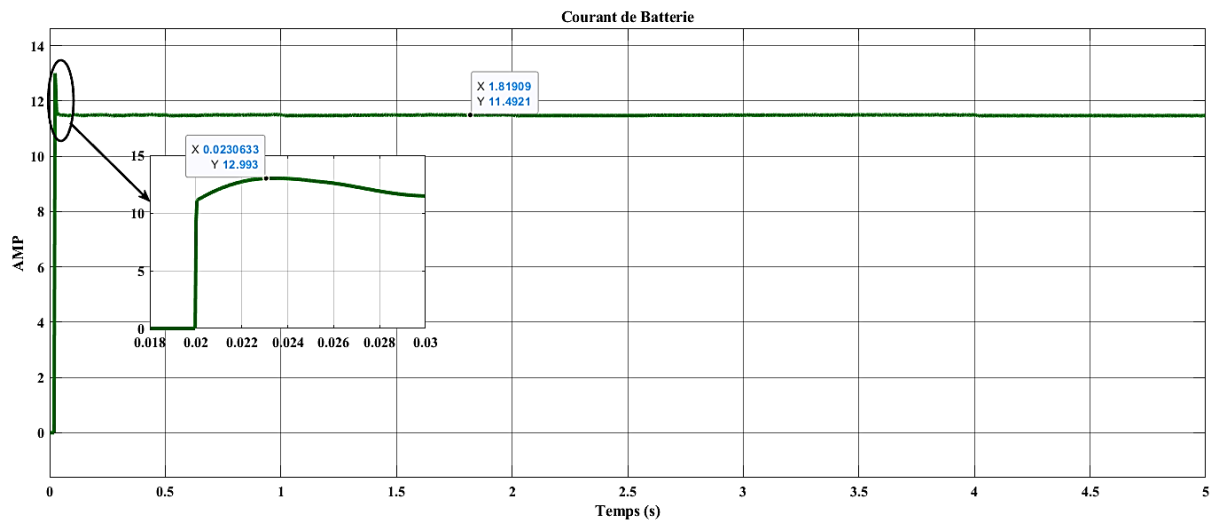


Figure 3.26: Courant de la Batterie

Le SOC est passé de **50%** à **50.01%**. Cette légère augmentation du SOC indique que la batterie a été faiblement rechargée pendant la période de mesure

$$\text{Temps de charge (en heures)} = \text{Capacité de la batterie (en Ah)} / \text{Courant de charge (en A)}$$

$$\text{Temps de charge} = 100 \text{ Ah} / 11.49 \text{ A}$$

Temps de charge \approx **8h 42min**, soit **1.4 fois** plus rapide qu'un système avec une seule bobine.

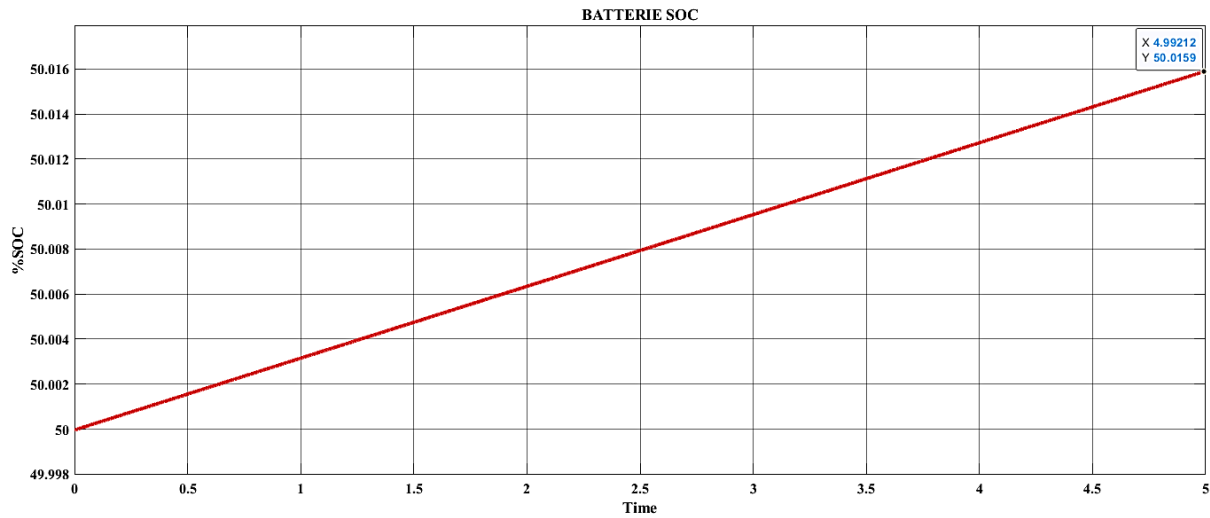


Figure 3.27: SOC de la batterie

La puissance transmise est égale initialement à une valeur maximale de **5830W**, puis elle se décroît pour se garder une valeur stable de **5219W**. Pour ce qui de la puissance reçue par la batterie, sa valeur dans un premier temps est de **5047W**, puis elle se fixe à une valeur de **4455W**.

Pour calculer l'efficacité du système, nous appliquons cette formule :

$$\text{Efficacité} = \text{Puissance de sortie (Pb)} / \text{Puissance d'entrée (Pt)}$$

$$\text{Efficacité} = 4455\text{W} / 5219\text{W} \approx 85.3\%$$

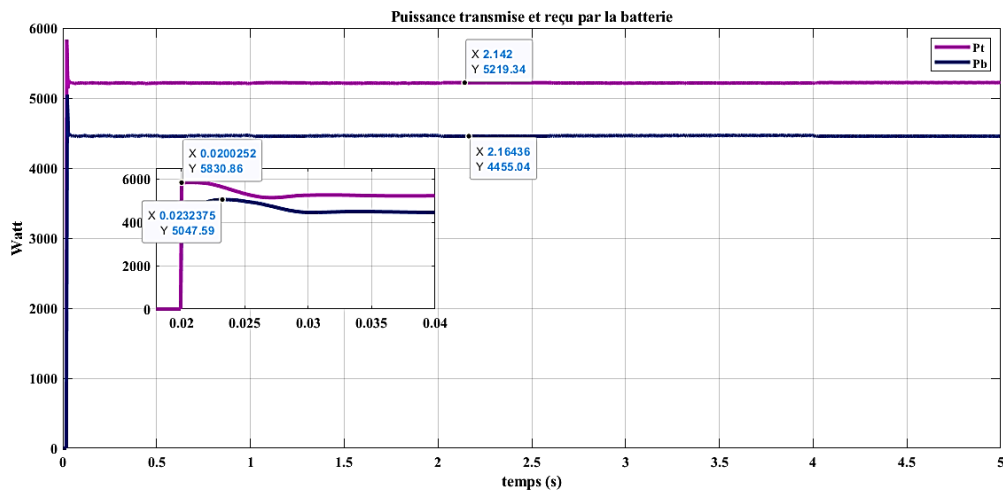


Figure 3.28: Puissance transmise et reçu par la batterie

3.2.3 Système de recharge avec une seule bobine réceptrice utilisant la topologie SP

En complément de notre étude portant sur la topologie de compensation série-série (SS) montré dans la figure 3.29, nous envisageons de procéder à des simulations du système de recharge sans fil en utilisant la topologie série-parallèle (SP) comme l'indique la figure 3.30. Cette approche nous permettra de comparer et d'évaluer les performances des deux configurations afin de mieux comprendre leurs avantages respectifs.

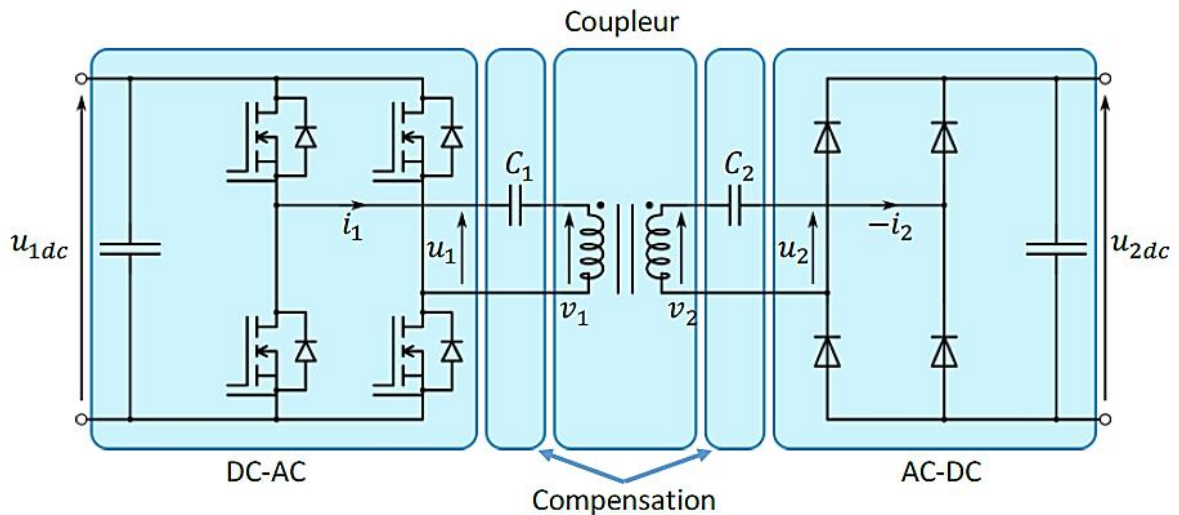


Figure 3.29: Structure électronique d'un système de transfert d'énergie par induction à compensation série-série

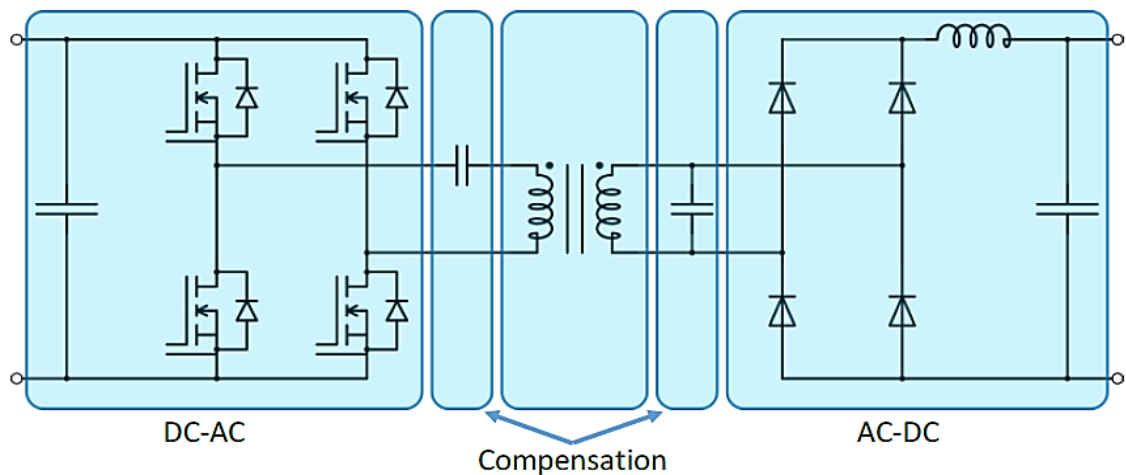


Figure 3.30: Structure électronique d'un système de transfert d'énergie par induction à compensation série-parallèle

D'après la figure 3.31 la tension de la source d'alimentation est constante d'une valeur de **220V**, conformément à la valeur que nous avons attribuée. Et à propos du courant alternatif, nous observons des irrégularités dans son signal, avec une valeur maximale de **22.81A**.

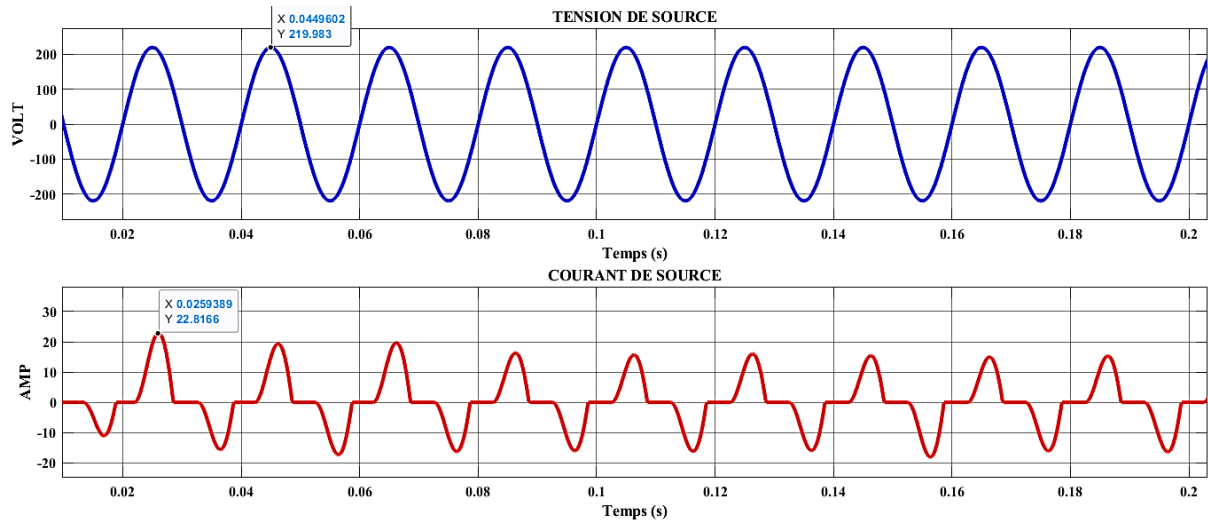


Figure 3.31: Tension et courant de source

Après la fermeture de l'AFE, la tension sinusoïdale montrée à la figure 3.32 provenant de la source est convertie en tension continue montrée à la figure 3.32 elle atteint d'abord une valeur de **202.77 V** avant de se régulariser à **187.71 V**. En ce qui concerne le courant, nous remarquons qu'il augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale de **9A**, puis diminue légèrement à **5.17A** et reste relativement fixe par la suite

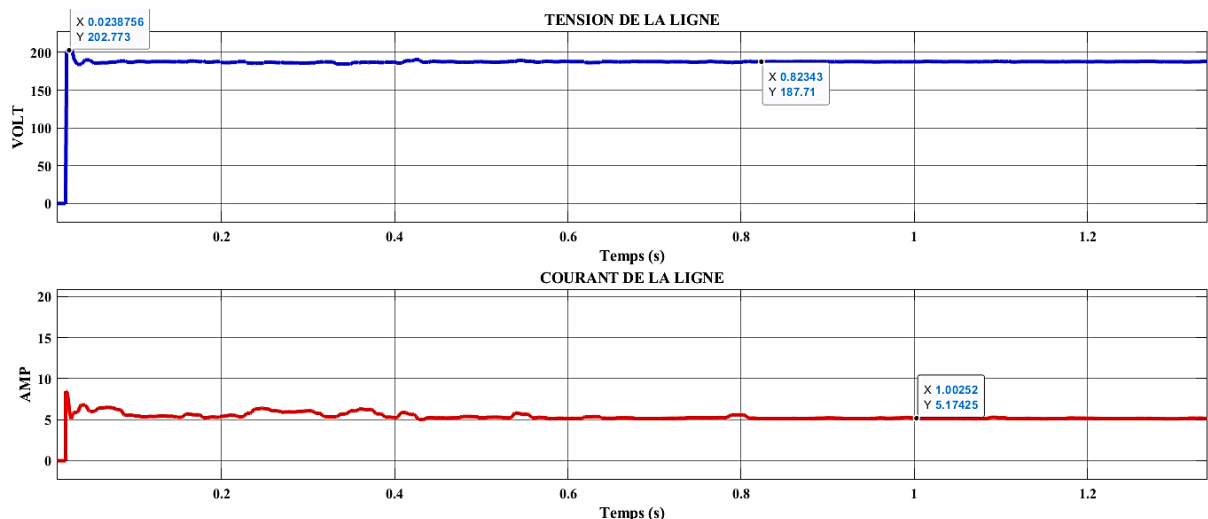


Figure 3.32: Tension et Courant DC de la ligne

La figure 3.33 présente la tension de la bobine émettrice qui un signal carré avec une valeur crête de **249 V**, indiquant une tension élevée Cette tension diminue ensuite à **152.93 V**, tout en conservant sa forme initiale. Cette variance perdure du début à la fin.

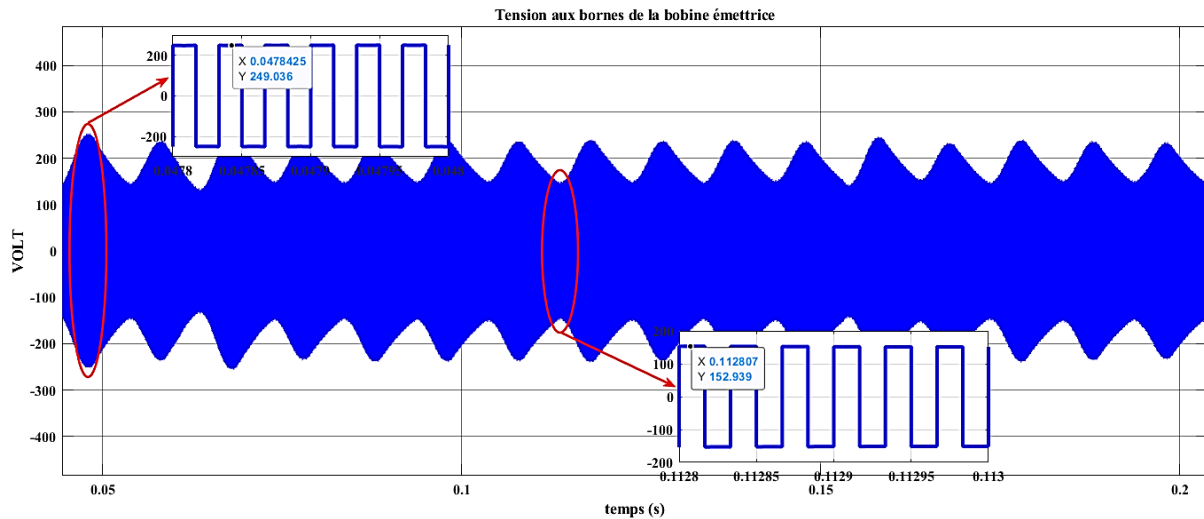


Figure 3.33: Tension aux bornes de la bobine émettrice

L'observation du courant de la bobine émettrice de la figure 3.34 montre également des fluctuations significatives. Se dernier a un profil alternatif, avec une valeur maximale de **30A** et une valeur minimale de **15 A**.

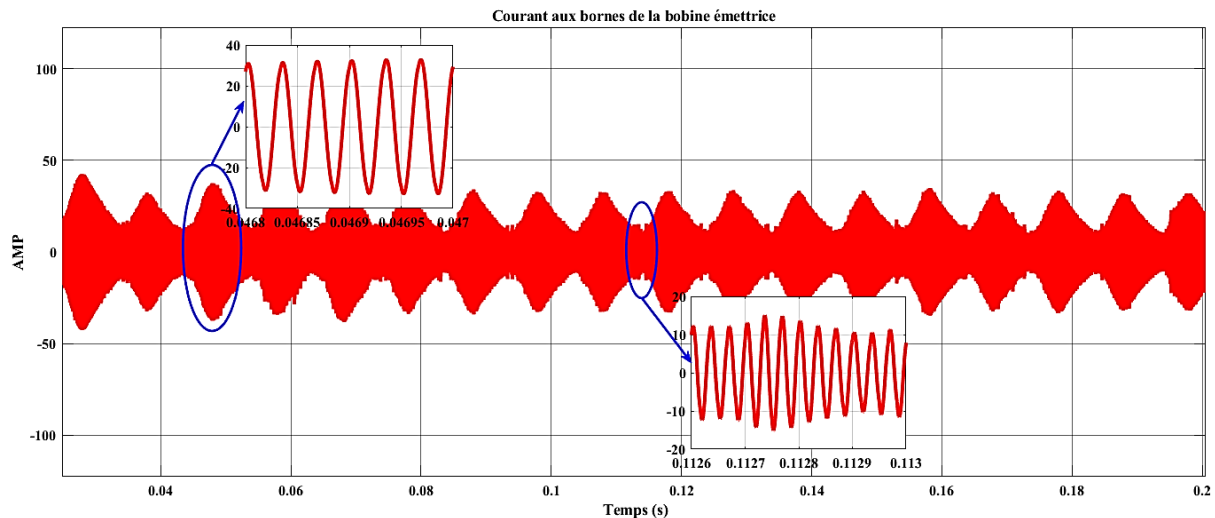


Figure 3.34: Courant aux bornes de la bobine émettrice

D'après la figure 3.35 nous prenons note que la tension aux bornes de la bobine réceptrice est un signal avec sinusoïdale non stable avec une valeur de **245.17 V**, à la suite cette caractéristique se transforme progressivement en un signal carré avec des valeurs maximales constantes de **389.42 V**.

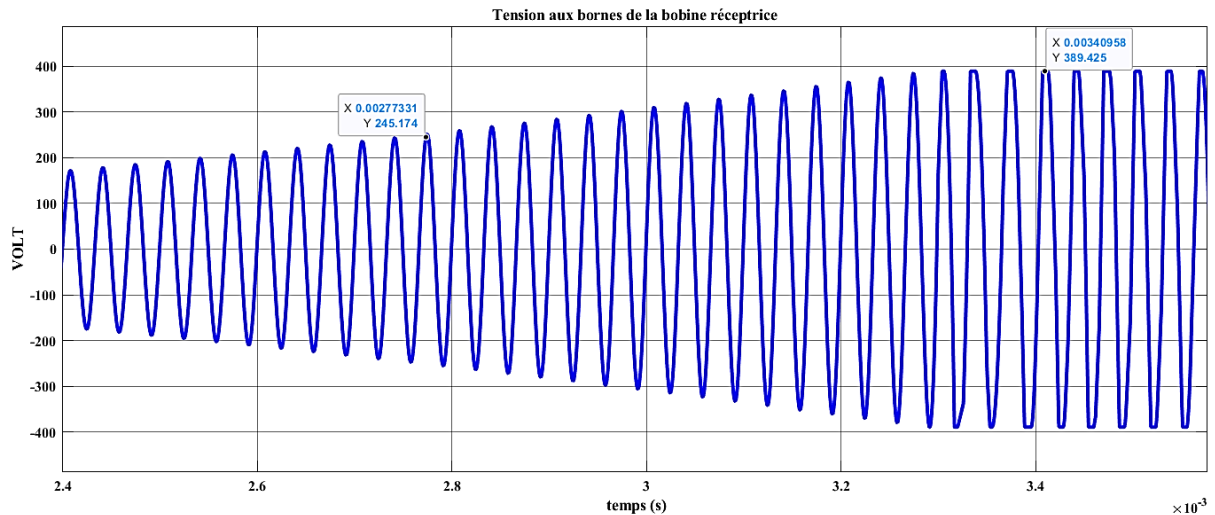


Figure 3.35: Tension aux bornes de la bobine réceptrice

Nous constatons que le de la bobine réceptrice est fort déformé et sa valeur est défaillante. Cette déformation peut être attribuée à divers facteurs tels que les variations d'impédance.

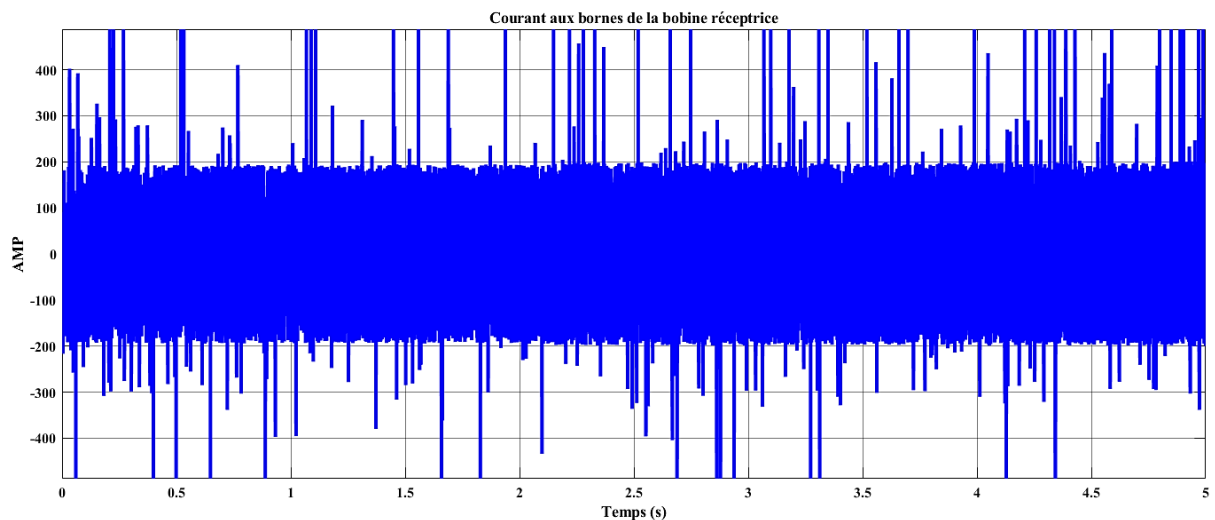


Figure 3.36: Courant aux bornes de la bobine réceptrice

Les figures 3.37 et 3.38 présentent la continuité et la stabilité de la tension de la batterie qui atteint la valeur crête de **387.82 V** et courant de la batterie d'une valeur max de **2.5A** puis se réduit à peine et garde une valeur continue de **1.4A**, le courant est relativement faible

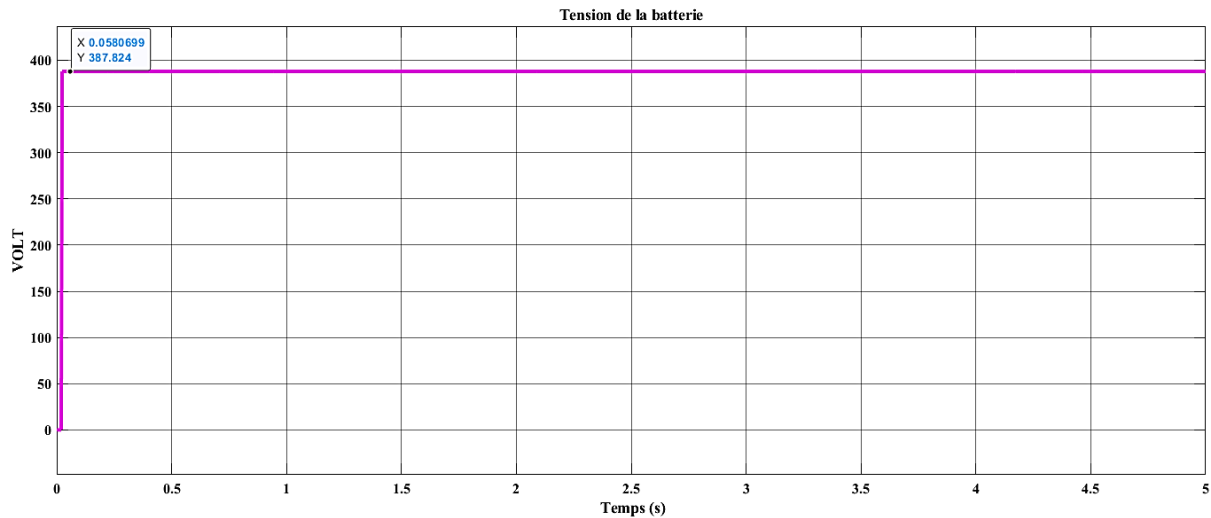


Figure 3.37: Tension de la batterie

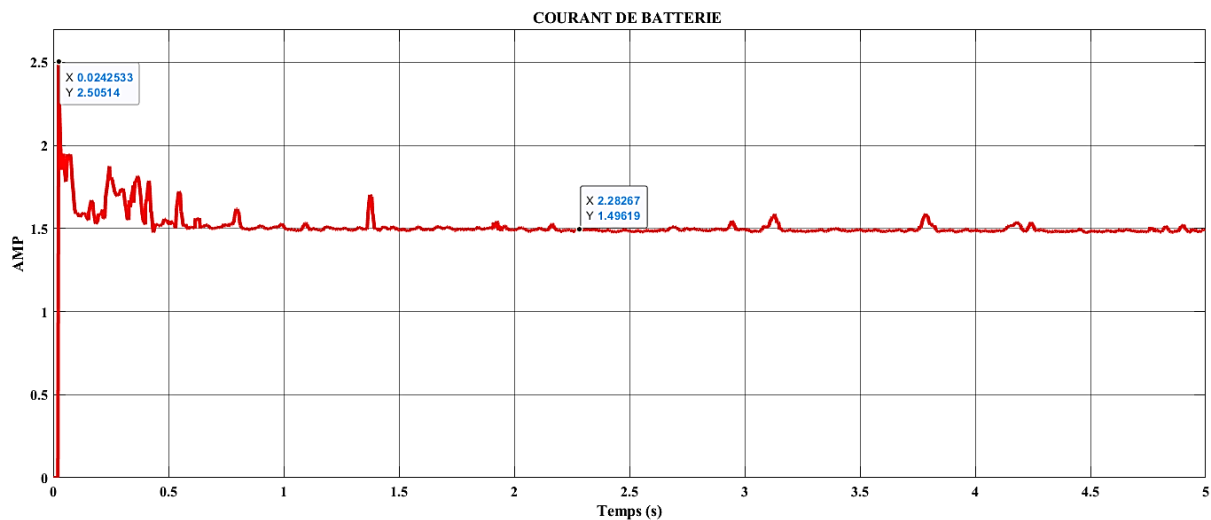


Figure 3.38: Courant de la Batterie

L'évolution lente du SOC de la batterie comme indiqué dans la figure 3.39, passant de **50%** à **50.002%**, peut s'expliquer par le faible courant de charge reçue par la batterie, qui est de **1.5A**, ainsi que par l'utilisation de la topologie Série-Parallèle (SP). Le temps de charge avec un courant de **1.5A** et une capacité de batterie de 100Ah est de **66.67 heures**

Cela indique clairement que la topologie affecte le temps de charge. La topologie SP, qui combine des connexions série et parallèle, peut nécessiter plus de temps pour charger la batterie en raison de la gestion plus complexe.

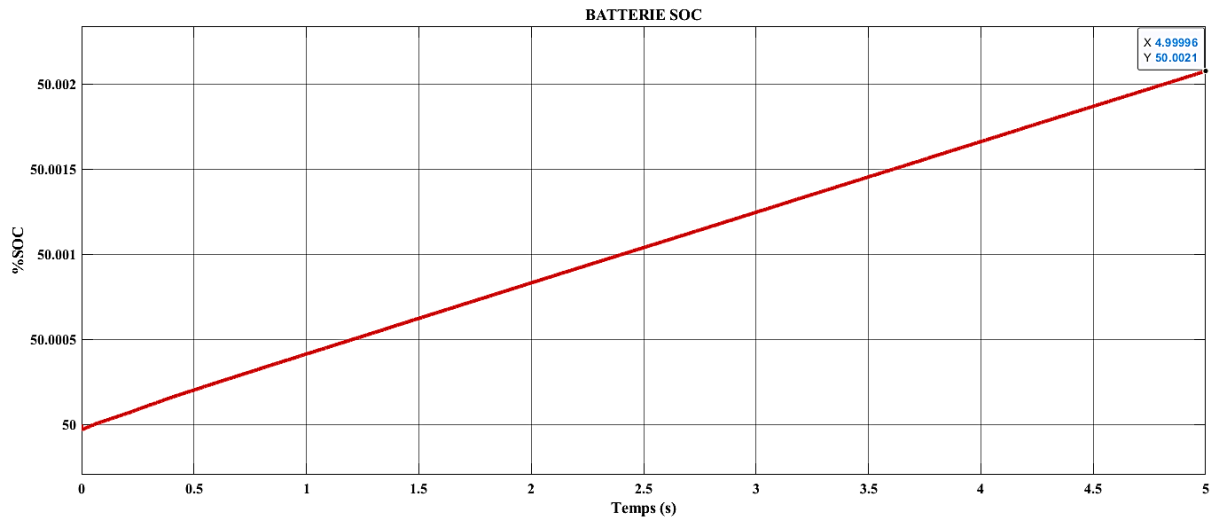


Figure 3.39: SOC de la batterie

La figure 3.40 montre les puissances transmise et reçue qui mettent en évidence une certaine variabilité au début avant de se stabiliser. La puissance transmise commence par augmenter jusqu'à atteindre une valeur maximale de **1621W**, puis se stabilise à **1010W**. De même, la puissance reçue augmente à **955W**, puis diminue pour se stabiliser à **582W**. Cela signifie que le système présente une efficacité de **57.6%**, ce qui indique que **57.6%** de la puissance d'entrée est convertie en puissance de sortie utilisable. Cette variabilité est due à la compensation SP ce qui indique un rendement inférieur à celui de la topologie SS.

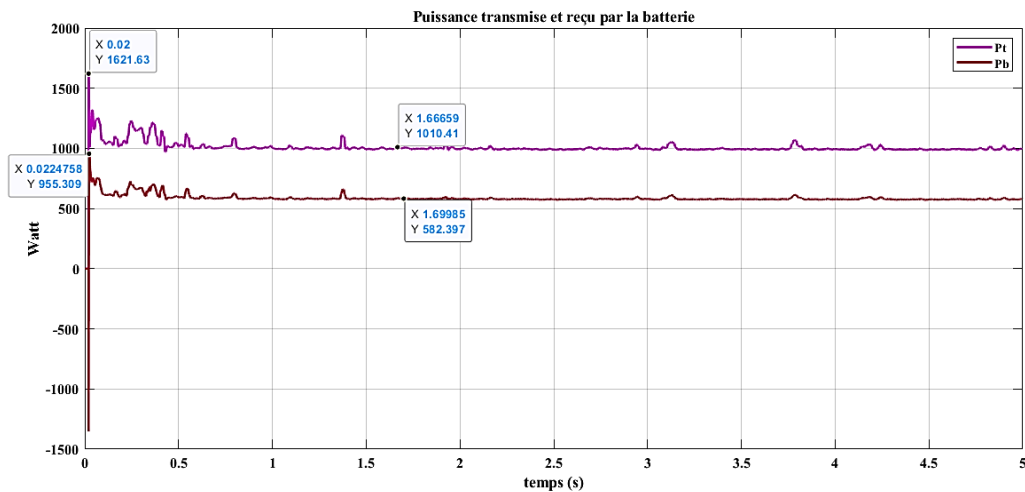


Figure 3.40: Puissance transmise et reçu par la batterie

3.2.3.1 Système de recharge avec deux bobines réceptrices utilisant la topologie SP

La figure 3.41 illustre que la tension de source est stable à **220V**, conformément à nos attentes. Cependant, le courant présente une forme d'onde alternative déformée. Il atteint

une valeur maximale de **47.99A**, puis diminue à **39.71 A** cette déformation de l'onde se maintient de manière alternative.

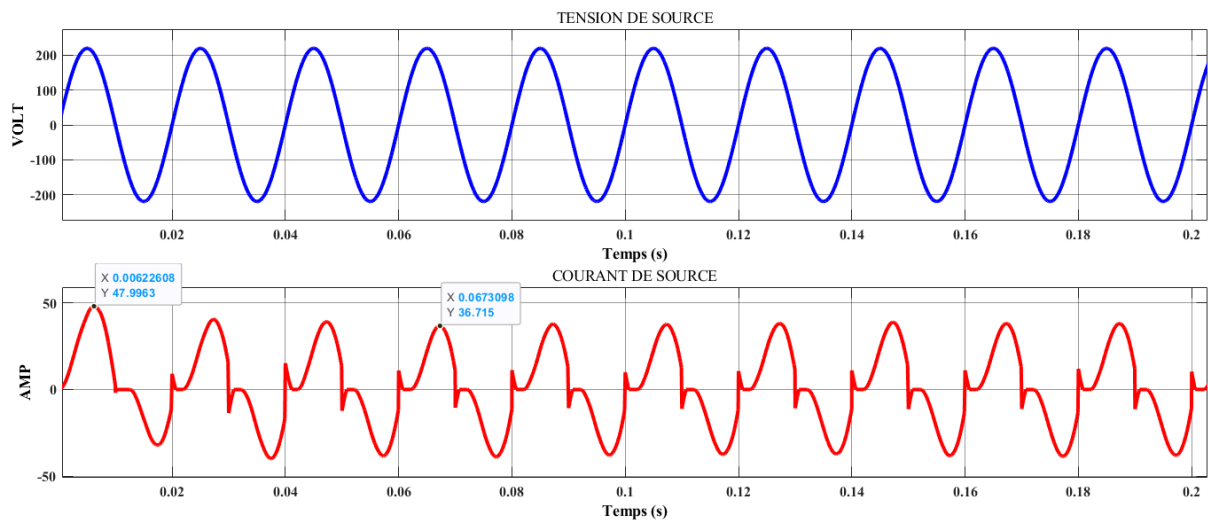


Figure 3.41: Tension et Courant de source

Après l'AFE, la figure 3.42 montre que la tension devient continue, passant d'une valeur maximale de **156.16 V** à une valeur stabilisée de **148.17 V**. De même, le courant de la ligne devient également continu avec une valeur maximale de **20.92A**, puis se stabilise à **18.21A**.

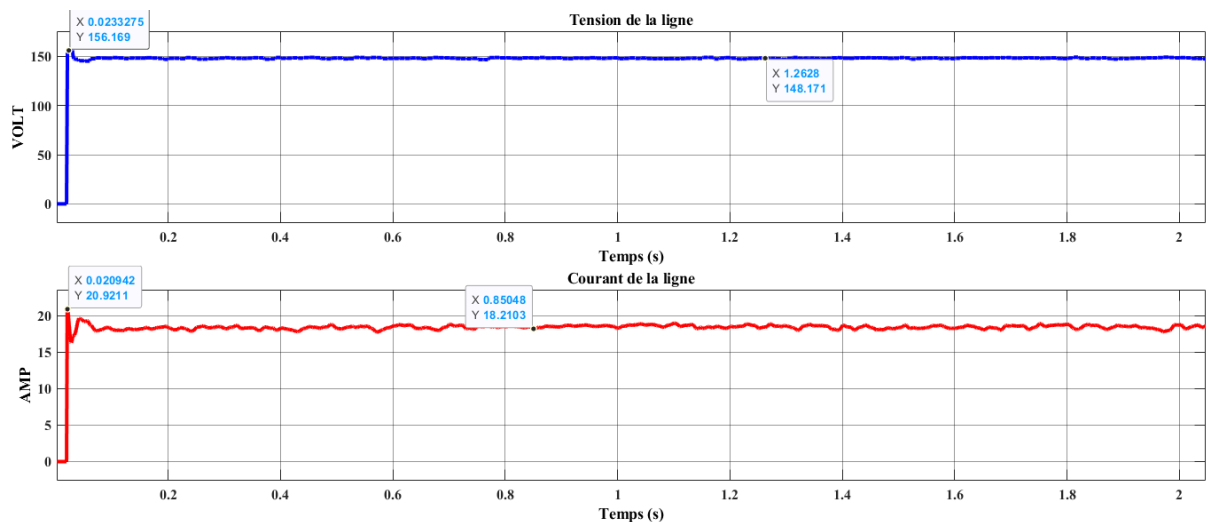


Figure 3.42: Tension et courant DC de Ligne

La tension aux bornes de la bobine émettrice de la figure 3.43 montre une variation entre une forme carrée avec une valeur de **122.66 V** et une autre période avec une forme carrée et une valeur de **194.28 V**.

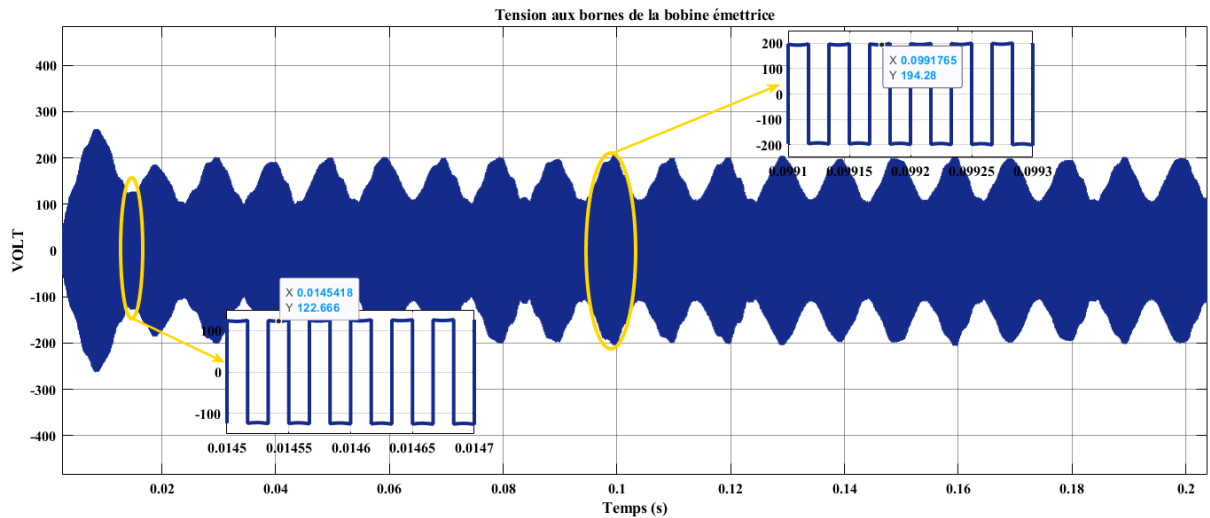


Figure 3.43: Tension aux bornes de la bobine émettrice

Le courant de la bobine émettrice montré dans la figure 3.44 présente une variation entre une forme alternée avec une valeur de **221.76 A** et une autre période alternée avec une valeur de **92.24 A**.

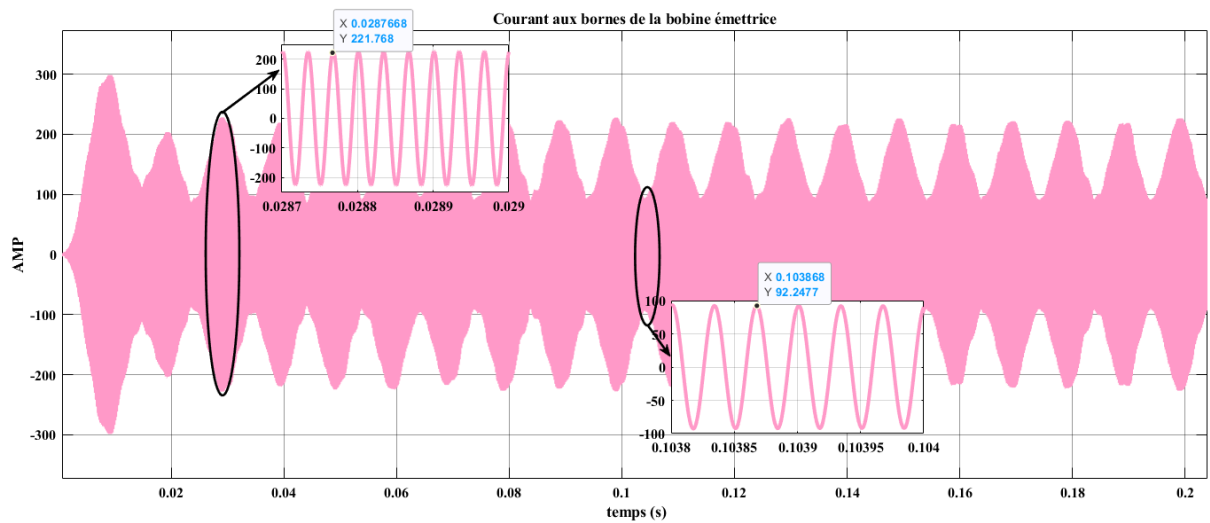


Figure 3.44: Courant aux bornes de la bobine émettrice

La figure 3.45 montre la que tension aux bornes de la bobine réceptrice au début, elle présente une forme sinusoïdale avec une valeur de **360.26 V**. Cependant, au fil du temps, cette forme alternée se transforme en un signal carré avec une valeur constante de **389.41 V**.

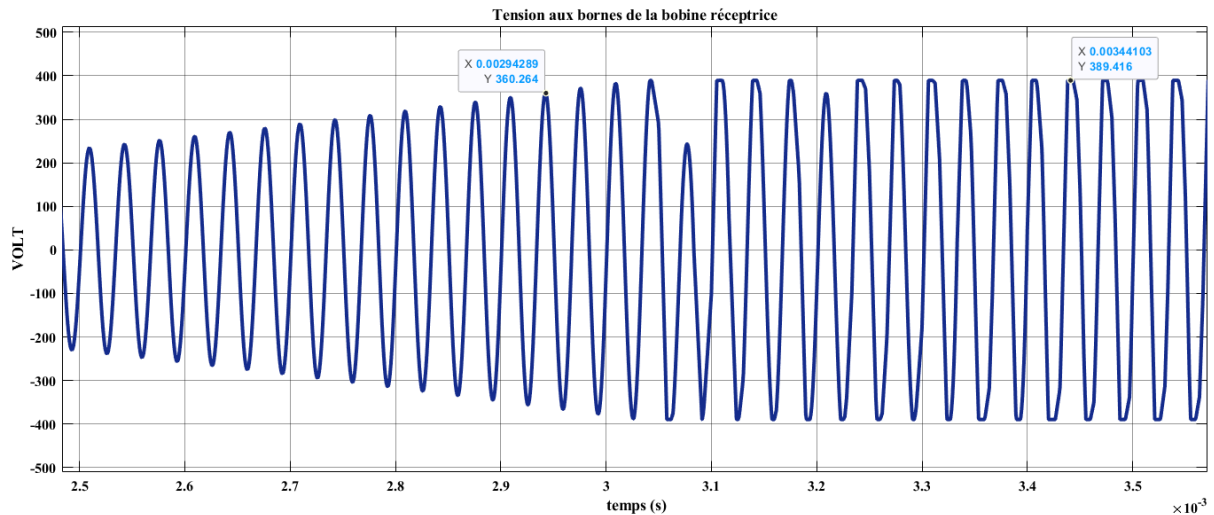


Figure 3.45: Tension aux bornes de la bobine réceptrice

Le courant de la bobine réceptrice indiqué dans la figure 3.46 présente une déformation importante avec de nombreuses perturbations. Cela signifie que le courant varie en amplitude et en forme au fil du temps, ce qui peut indiquer des problèmes de stabilité ou de qualité de la transmission de l'énergie sans fil.

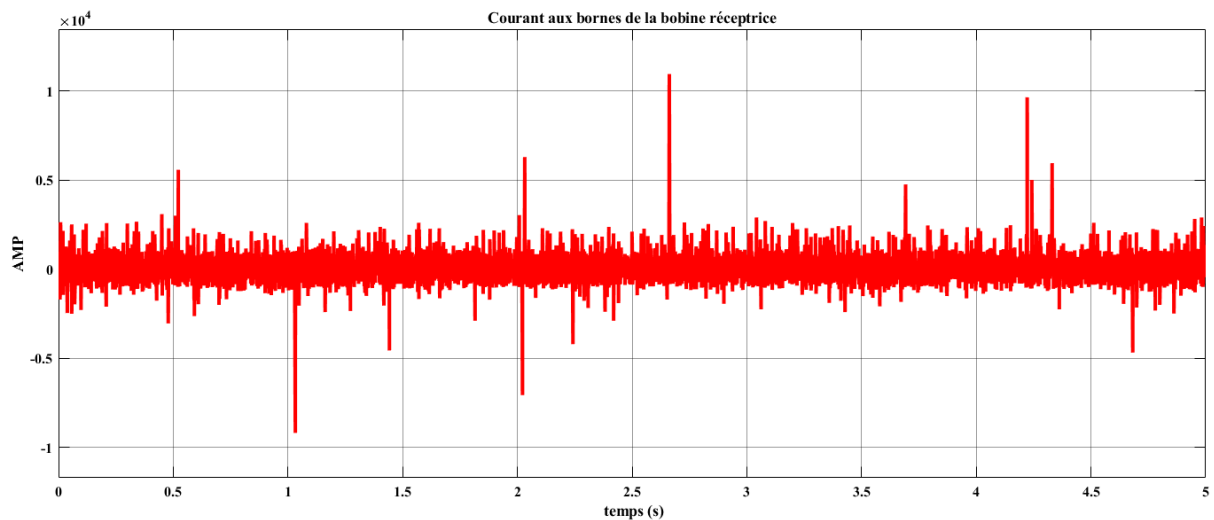


Figure 3.46: Courant aux bornes de la bobine réceptrice

Nous observons dans la figure 3.47 et 3.48 que la tension reçue par la batterie est continue et stable avec une valeur de **387.92 V** et le courant de la batterie varie pendant le processus de recharge indique une instabilité dans le flux d'énergie. Le courant augmente initialement jusqu'à atteindre une valeur maximale de **5.8A**, puis diminue à **4.15A**, mais continue de

fluctuer.

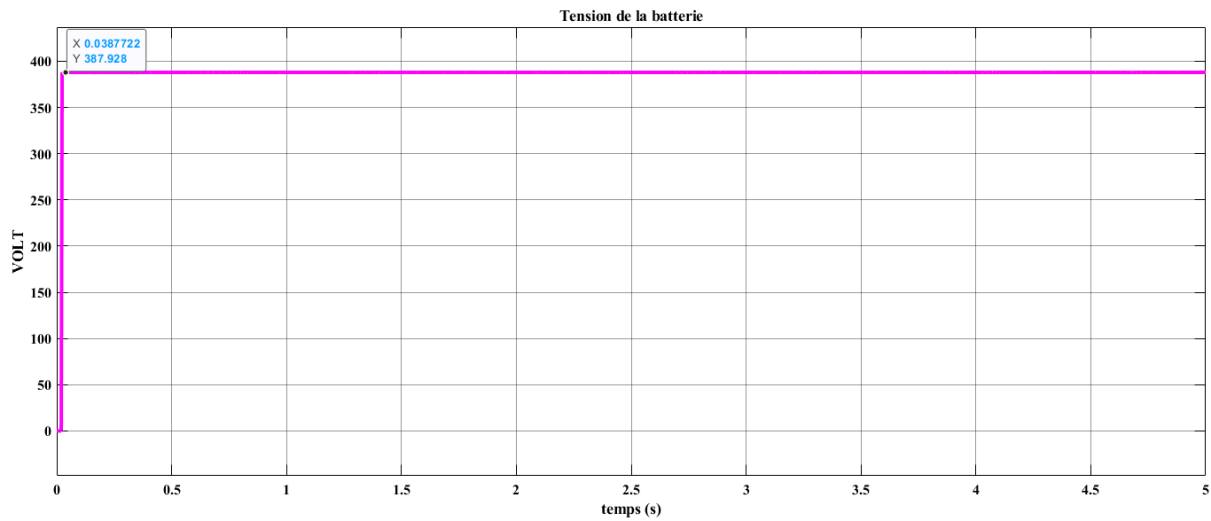


Figure 3.47: Tension de la Batterie

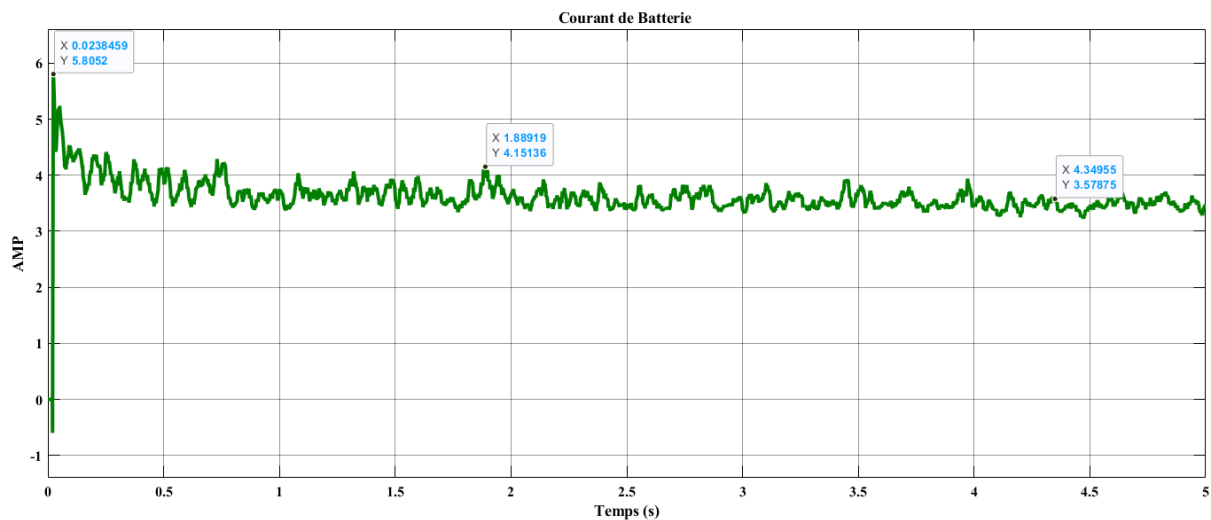


Figure 3.48: Courant de la Batterie

La variation du SOC dans la figure 3.49 de la batterie de **50%** à **50.005%** en seulement 5 secondes indique une augmentation très lente de la charge de la batterie. Cela peut être dû au faible courant de charge de **4A**.

$$\text{Temps de recharge} = 100\text{Ah} / 4\text{A} = 25 \text{ heures}$$

Cela signifie qu'il faudrait environ **25 heures** pour charger complètement la batterie à partir de 50% de SOC avec un courant de charge de **4A**.

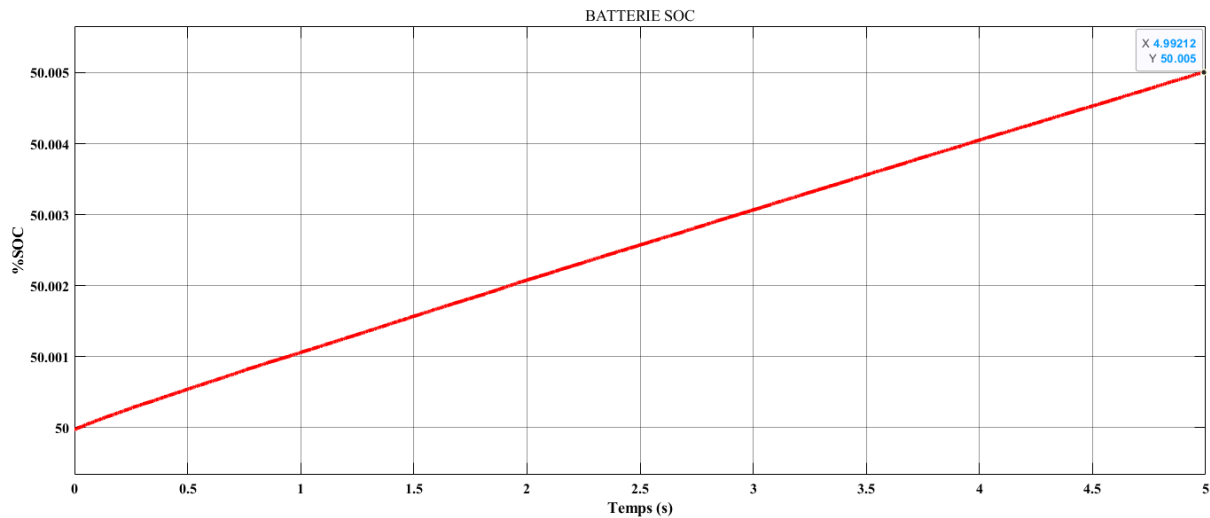


Figure 3.49: SOC de la Batterie

L'observation des valeurs de puissance transmise et reçue dans la figure 3.50 montre une variation importante et instable. La puissance transmise atteint une valeur maximale de **3472.71 W** puis diminue à **2904.46 W** mais ne se stabilise pas. De même, la puissance reçue par la batterie atteint **2249.45 W** puis diminue à **1494.67 W** mais elle n'est pas stable non plus. Cela indique que seulement **64.76%** de la puissance transmise est effectivement reçue par la batterie.

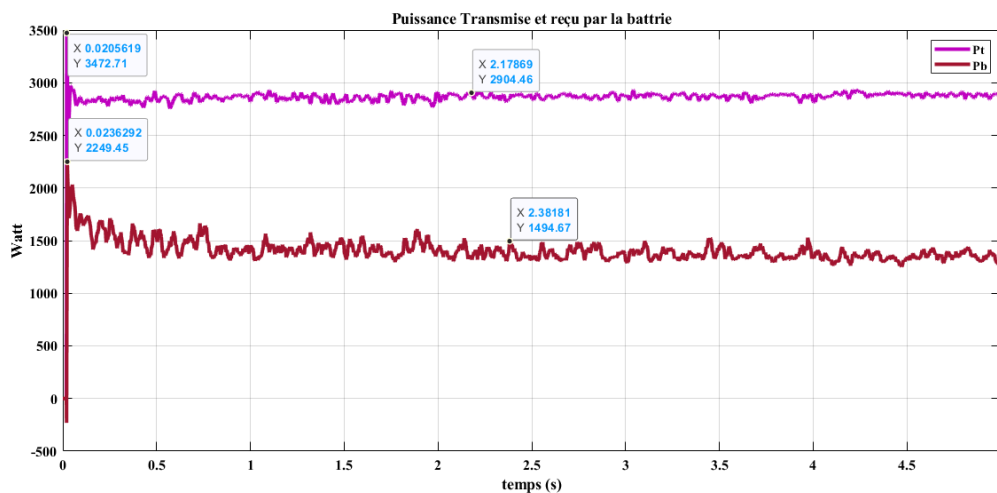


Figure 3.50: Puissance Transmise et reçu par la batterie

3.3 Comparaison des performances des topologies de transmission d'énergie sans fil

Le tableau présente différentes mesures et valeurs pour chaque configuration, en examinant les valeurs, il est possible de comparer les performances des deux configurations

telles que le courant de source, la tension de ligne continue, le courant de ligne continue, la tension primaire rms, la tension du secondaire rms, le courant primaire rms, le courant du secondaire rms, la tension de la batterie, le courant de la batterie, le temps de recharge, la puissance transmise et la puissance reçue.

Tableau 3.1 : Résultats de la simulation

	<i>Système avec une seule bobine réceptrice</i>		<i>Système avec deux bobines réceptrices</i>	
	<i>Compensation série-série (SS)</i>	<i>Compensation série-parallèle (SP)</i>	<i>Compensation série-série (SS)</i>	<i>Compensation série-parallèle (SP)</i>
<i>Courant de Source (A)</i>	46.76	22.81	66	36.71
<i>Tension de ligne continue (V)</i>	180.29	187.71	147.94	148.27
<i>Courant de ligne continue (A)</i>	19.23	5.17	33.11	18.21
<i>Tension Primaire rms (V)</i>	301.73	249	279.14	194.28
<i>Tension du secondaire rms (V)</i>	389.37	389.42	390.36	389.41
<i>Courant du primaire rms (A)</i>	21.54	30	176	221.76
<i>Courant du secondaire rms (A)</i>	24.85	Déformé	36.54	Déformé
<i>Tension de la batterie (V)</i>	388	387.82	388.17	387.92
<i>Courant de la batterie (A)</i>	8.22	2.5	11.46	4.15
<i>Temps de Recharge</i>	12h 46min	66h40min	8h 42min	25h
<i>Puissance transmise (W)</i>	3503	1010	5219	2904
<i>Puissance reçu</i>	3191	582	4455	1494

(W)				
Efficacité η %	91%	57.6%	85.3%	64.76%

- **Interprétation des résultats**

D'après le tableau 3.1 nous constatons que :

1. Pour la tension de la batterie, les systèmes avec une seule bobine réceptrice et les systèmes avec deux bobines réceptrices ont des tensions similaires, avec des valeurs de 388V et 387V respectivement.
2. Nous remarquons que les courants de la batterie est plus intense dans la configuration de deux bobines réceptrices et topologie SS.
3. Le système SS avec deux bobines offre un temps plus court par rapport aux autres.
4. Tout d'abord, en considérant une seule bobine réceptrice, on observe que la compensation série-série (SS) offre une efficacité de 91%. En revanche, la compensation série-parallèle (SP) présente une efficacité de 57.6%.
5. Ensuite, en passant à une configuration avec deux bobines réceptrices, on constate que la compensation série-série (SS) offre une efficacité de 85.3%. La compensation série-parallèle (SP) dans cette configuration présente une efficacité de 64.76%.
6. En comparant une seule bobine avec deux bobines, on remarque que la configuration avec deux bobines réceptrices offre généralement des performances supérieures en termes de puissance transmise et reçue, ainsi qu'en efficacité. Cependant, il convient de noter que la configuration série-série avec une seule bobine réceptrice présente une efficacité légèrement meilleure que la configuration série-parallèle avec deux bobines.

3.4 Conclusion

Les résultats de notre étude ont révélé que le système de recharge sans fil avec une seule bobine réceptrice présente une efficacité plus élevée. Cela signifie qu'une plus grande quantité d'énergie est transférée du côté émetteur au côté récepteur, ce qui se traduit par une meilleure puissance reçue par le véhicule électrique. Cette configuration est particulièrement intéressante pour maximiser l'efficacité énergétique lors de la recharge sans fil.

Cependant, nous avons également constaté que le système SS avec deux bobines réceptrices présente un avantage significatif en termes de temps de recharge. En effet, la présence de deux bobines permet d'augmenter la puissance transmise, ce qui permet de

recharger les véhicules électriques plus rapidement. Ce gain de temps peut être particulièrement précieux dans des situations où une recharge rapide est nécessaire.

En ce qui concerne la compensation série-série (SS), nos résultats ont montré qu'elle améliore les performances dans les deux configurations. Que ce soit avec une seule bobine réceptrice ou avec deux bobines réceptrices, la compensation SS a permis un transfert d'énergie plus efficace et une meilleure correspondance d'impédance entre les bobines émettrices et réceptrices. Cela a contribué à une augmentation de l'efficacité globale du système.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire a examiné en détail le système de recharge sans fil pour les véhicules électriques (VE) en mettant l'accent sur ses principes fondamentaux, les technologies associées et les divers aspects liés à son efficacité, sa commodité et sa viabilité. Nous avons approfondi notre compréhension des avantages et des inconvénients de la recharge sans fil par rapport à la recharge avec fil.

Dans le premier chapitre, nous avons réalisé un état de l'art des véhicules électriques et des technologies de recharge sans fil existantes. Nous avons examiné les avancées récentes dans le domaine des VE, y compris les progrès en matière de performances des batteries, l'augmentation de l'autonomie des véhicules

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes concentrés sur la modélisation du système de recharge sans fil. Nous avons étudié les principes fondamentaux de la transmission d'énergie sans fil, Nous avons développé un modèle mathématique pour décrire le fonctionnement du système de recharge sans fil.

Le troisième chapitre a été consacré à la simulation et aux résultats acquis. Nous avons utilisé le modèle développé précédemment pour effectuer des simulations et évaluer les performances du système de recharge sans fil à l'aide d'une seule bobine puis deux bobine réceptrices. Nous avons analysé les résultats obtenus tels que : l'état de charge, le temps de charge, tension de la batterie, courant de la batterie la transmission d'énergie

Par la suite, nous avons examiné les différentes méthodes et techniques de compensation d'énergie, telles que la compensation série-série (SS) et la compensation série-parallèle (SP), nous avons analysé leur impact sur l'efficacité globale du système.

Sur la base des analyses réalisées dans cette étude, nous en déduisons les conclusions suivantes :

- Tout d'abord, en utilisant une seule bobine dans le système, nous avons constaté que celui-ci fonctionnait correctement, délivrant la puissance souhaitée à la batterie. Le temps de chargement de la batterie a été mesuré à environ 12 heures, ce qui est considéré comme acceptable pour cette configuration.

- Ensuite, en introduisant une deuxième bobine dans le système, nous avons observé une amélioration significative de la puissance transmise, atteignant 5 kW, et une augmentation de la puissance reçue par la batterie, atteignant 4.5 kW. Le temps de recharge de la batterie a également été réduit, passant à seulement 8 heures. Cela démontre clairement les avantages d'utiliser deux bobines dans le système pour une recharge plus rapide et plus efficace.
- Par ailleurs, nous avons effectué une comparaison entre les topologies de compensation SS (série-série) et SP (série-parallèle). Dans les deux configurations, nous avons constaté que la topologie de compensation SS était préférable. En utilisant la compensation SS, nous avons observé une puissance transmise plus élevée, un temps de recharge plus court et une efficacité supérieure par rapport à la compensation SP.
- Nos recherches et simulations ont démontré que l'utilisation d'un système de recharge sans fil avec deux bobines et une compensation SS offre des avantages significatifs en termes de puissance transmise, de temps de recharge et d'efficacité.

Le travail élaboré dans notre étude, laisse les portes ouvertes devant d'éventuelles recherches futures. Ainsi, nous proposons nos perspectives de recherche sure :

- ✓ La charge dynamique implique la recharge des véhicules électriques pendant leur déplacement, par exemple, sur des routes équipées de bobines de transmission intégrées.
- ✓ L'intégration des énergies renouvelables dans les systèmes de recharge sans fil offre une opportunité de réduire davantage l'empreinte carbone des véhicules électriques.

ANNEXE

Paramètres du système de compensation

<i>Une seul Bobine</i>	<i>SS</i>	<i>SP</i>
<i>C1</i>	<i>105.74nF</i>	<i>109.69nF</i>
<i>C2</i>	<i>105.74nF</i>	<i>109.69nF</i>
<i>Deux Bobines</i>	<i>SS</i>	<i>SP</i>
<i>C1</i>	<i>105.74nF</i>	<i>109.69nF</i>
<i>C2</i>	<i>105.74nF</i>	<i>109.69nF</i>

Paramètres des bobines dans le système avec deux Bobines

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Distance entre les Bobines D(m)</i>	<i>0.5</i>
<i>Inductance L1 (μH)</i>	<i>133.08</i>
<i>Inductance L2 (μH)</i>	<i>256.79</i>
<i>Inductance mutuelle M (μH)</i>	<i>28</i>

Paramètres des bobines dans le système avec une seule bobine

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Distance entre les Bobines D(m)</i>	<i>0.15</i>
<i>Inductance L1 (μH)</i>	<i>266.16</i>
<i>Inductance L2 (μH)</i>	<i>256.79</i>
<i>Inductance mutuelle M (μH)</i>	<i>85.46</i>

Paramètres de la Batterie Li-Ion

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Tension Nominal</i>	<i>360 V</i>
<i>Capacité nominale (Ah)</i>	<i>100 Ah</i>

<i>État de charge initial (%)</i>	<i>50</i>
<i>Temps de réponse de la batterie (s)</i>	<i>10</i>

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Larminie, James** ‘Electric vehicle technology explained’–Second Edition. ISBN 978-1-119-94273-3
- [2] <https://www.energy.gov/timeline-history-electric-car> / consulté le 08.04 2023
- [3] **Rohan Sarode, Ankita Eadke** ‘ELECTRIC VEHICLE (Construction and Working principle)’, ‘International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)’, Volume: 07 Issue: 10 | Oct 2020
- [4] <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>
- [5] **Swaraj Ravindra Jape and Archana Thosar**, ‘comparison of electric motors for electric vehicle Application’, IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308
- [6] <https://circuitdigest.com/article/different-types-of-motors-used-in-electric-vehicles-ev>
- [7] **Ansh Thattil, Sumit Vachhani, Darshan Raval, Piyush Patel and Priyanka Sharma**, ‘Comparative Study of using Different Electric Motors for EV’, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e-ISSN: 2395-0056 Volume: 06 Issue: 04 | Apr 2019
- [8] **XD. Xue, KWE Cheng, et NC. Cheung**. «Selection of electric motor drives for electric vehicles. In 2008 Australasian», Universities Power Engineering Conference, pages 1–6. IEEE, 2008.
- [9] **Araria.R** , ‘Contribution A La Modélisation Et La Commande D’un Véhicule Electrique Hybride A Architecture Série/Parallèle (Étude Théorique Et Expérimentale)’, Thèse Doctorat, Université Ibn Khaldoun Tiaret,2022
- [10] **Gabsi, M. and Khedher.A.** (2012) Introduction aux convertisseurs statiques. Revue de l'électricité et de l'électronique, 5, pp. 73-80.
- [11] **C. Chan**, « L'état de l'art des véhicules électriques et hybrides », Proc. IEEE vol. 90 (n° 2), 247 275.2002
- [12] **Amir Khajepour**, "Electric and Hybrid Vehicles: Technologies, Modeling and Control - A Mechatronic Approach", Toronto University Press.
- [13] **K.T. Chau, Y.S. Wong, C.C. Chan**, « An overview of energy sources for electric vehicles », Energy Conversion & Management 40 (1999) 1021-1039

- [14] **Sanguesa, J.A.; Torres-Sanz, V.; Garrido, P.; Martinez, F.J.; Marquez-Barja, J.M.** A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities* **2021**, <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>
- [15] **E Fantin Irudaya Raj**, « Review of different types of batteries used in electric vehicles and their charging methods », *international journal of current engineering and scientific research (ijcesr)*, ISSN (PRINT): 2393-8374, (ONLINE): 2394-0697, VOLUME-5, ISSUE-12, 2018
- [16] **James Larminie, John Lowry**, « ELECTRIC VEHICLE TECHNOLOGY EXPLAINED SECOND EDITION », SBN 978-1-119-94273-3
- [17] **K.T. Chau, Y.S. Wong, C.C. Chan**, An overview of energy sources for electric vehicles, *Energy Conversion & Management* **40** (1999) 1021-1039
- [18] **A. Burke**, «Ultra condensateurs : pourquoi, comment et où est la technologie. J. Sources d'alimentation», **91**, 3750, 2000.
- [19] **Chen, Y., Gong, Y., & Xiang, Y.** (2021). A Review of Flywheel Energy Storage System. *IEEE Access*, **9**, 46763-46778.
- [20] **E Fantin Irudaya Raj**, « Review of different types of batteries used in electric vehicles and their charging methods », *IJCESR* , ISSN (PRINT): 2393-8374, (ONLINE): 2394-0697, VOLUME-5, ISSUE-12, 2018
- [21] **Bakker S, Leguijt P, van Lente eH**, Niche accumulation and standardization - the case of electric vehicle recharging plugs, *Journal of Cleaner Production* (2015), doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.069.
- [22] <https://www.evexpert.eu/eshop1/knowledge-center/connector-types-for-ev-charging-around-the-world>
- [23] <https://cad-block.com/508-electric-vehicle-connector.html>
- [24] **Bansal, Rajeev.** *IEEE Antennas & : Propagation Magazine*. Vol. 51(2009) 153.
- [25] "Wireless charging for electric vehicles (EVs): a review of technologies and systems," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 955-965, Jun. 2018.
- [26] **C. Panchal** , Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system, *Eng. Sci. Tech., Int. J.* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015>
- [27] **Q. Zhu, L. Wang, C. Liao**, Compensate capacitor optimization for kilowatt-level magnetically resonant wireless charging system, *Indust. Electr., IEEE Trans.* (2014) 1.

- [28] **M. SangCheol, K. Bong-Chul, C. Shin-Young, A. Chi-Hyung, M. Gun-Woo**, Analysis and design of a wireless power transfer system with an intermediate coil for high efficiency, *Indust. Electr., IEEE Trans.* 61 (2014) 5861–5870.
- [29] **G. D. Andre and D. W. G. Dorrell**, "Inductive Power Transfer for Mobile Applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Feb. 2011.
- [30] **S. A. Mir and M. U. Khan**, "A Review of Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Prospects to Enhance Sustainable Mobility", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 43041-43057, 2018.
- [31] **J. Wu** "Design and Optimization of a Permanent Magnet-Based Wireless Charging System for Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 7, 2016.
- [32]: **A. Kurs**, "Wireless Power Transfer: A Survey of Inductive Coupling and Resonant Techniques", et al., *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 9, pp. 4168-4183, Sept. 2012.
- [33] **K.A. Kalwar, M. Aamir, S. Mekhilef**, inductively coupled power transfer (ICPT) for electric vehicle charging – a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 47 (2015) 462–475
- [34] **K. Aditya, V. Sood, S. Williamson**, Magnetic characterization of unsymmetrical coil pairs using archimedean spirals for wider misalignment tolerance in IPT systems, *IEEE Trans.* (2017).
- [35] **S. Bhattacharya, Y.K. Tan**, "Design of static wireless charging coils for integration into electric vehicle", *Sustain. Energy Technol. (ICSET) IEEE Third Int. Conf. 2012* (2012) 146–151.
- [36] **M. Budhia, G.A. Covic, J.T. Boys**, Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems, *Power Electr., IEEE Trans.* 26 (2011) 3096–3108.
- [37] **Zhang, K., Zhang, K., & Qiu, M.** (2018). A comprehensive review of wireless power transfer technology. *Journal of Power Sources*, 379, 41-52.
- [38] **Sbordone, D.; Bertini, I.; Di Pietra, B.; Falvo, M.C.; Genovese, A.; Martirano, L.** EV fast charging stations and energy storage technologies: A real implementation in the smart micro grid paradigm. *Electr. Power Syst. Res.* 2015, 120, 96–108
- [39] <https://www.interventionprevention.com/la-securite-des-voitures-electriques/>
08.04
- [40] <https://www.ecoconso.be/fr/content/voiture-electrique-ses-avantages-et-inconvenients>
consulté le 08.04

- [41] **Eric Labouré**, 'Recharge sans contact des véhicules électriques', Culture Science de l'ingénieur, édité le 11/05/2020, Ecole normal supérieur de Paris-Saclay
- [42] **Naoui, Mohamed; Flah, Aymen; Alqarni, Mohammed; Turkey, Rania A.**; Alamri, Basem; Ali, Ziad M.; Abdel Aleem, Shady H.E. "A new wireless charging system for electric vehicles using two receiver coils." *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, 2022, article 101569. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.08.012>
- [43] **Naoui, M., Flah, A., Turki, E. A., El-Bayeh, C. Z., Sbita, L., Ghoneim, S. S. M., & Eicker**, (2022). A Comprehensive Analysis of Wireless Charging Systems for Electric Vehicles. *IEEE Access*, 10, 60245-60259. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3057933.
- [44] **G. Rituraj, E. R. Joy, B. K. Kushwaha, and P. Kumar**, "Analysis and comparison of series-series and series-parallel topology of contactless power transfer systems," in *Proc. IEEE Region Conf. (TENCON)*, Oct. 2014, pp. 16.
- [45] **M. K. Naik, M. Bertoluzzo, and G. Buja**, "Design of a contactless battery charging system," in *Proc. Africon*, Sep. 2013, pp. 16
- [46] **Mohammad Ibrahim**, 'Wireless Inductive Charging for Electrical Vehicles: Electromagnetic Modelling and Interoperability Analysis. Electric power'. Université Paris Sud - Paris XI, 2014.
- [47] **B. Minnaert, F. Mastri, M. Mongiardo, A. Costanzo, and N. Stevens**, "Constant capacitive wireless power transfer at variable coupling," in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, May 2018, pp. 14.
- [48] **H.-D. Lang, A. Ludwig, and C. D. Sarris**, "Convex optimization of wireless power transfer systems with multiple transmitters," *IEEE Trans Antennas Propag.*, vol. 62, no. 9, pp. 46234636, Sep. 2014.
- [49] **D. Ustun, S. Balci, and K. Sabanci**, "A parametric simulation of the wireless power transfer with inductive coupling for electric vehicles, and modelling with artificial bee colony algorithm," *Measurement*, vol. 150, Jan. 2020, Art. no. 107082.
- [50] **S.Wang, D. G. Dorrell, Y. Guo, and M. F. Hsieh**, "Inductive charging coupler with assistive coils," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 7, pp. 1013, Mar. 2016.
- [51] **Y. Shi, Y. Zhang, M. Shen, Y. Fan, C. Wang, and M. Wang**, "Design of a novel receiving structure for wireless power transfer with the enhancement of magnetic coupling," *AEU-Int. J. Electron. Commun.*, vol. 95, pp. 236241, Oct. 2018.
- [52] **J. H. Kim, B.-S. Lee, J.-H. Lee, S.-H. Lee, C.-B. Park, S.-M. Jung, S.-G. Lee, K.-P. Yi, and J. Baek**, "Development of 1-MW inductive power transfer system for a high-speed train," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 10, pp. 62426250, Oct. 2015.

ملخص

في هذا العمل درسنا نمذجة و محاكاة نظام الشحن اللاسلكي لمركبة كهربائية باستعمال نظام ذو وشيعة استقبال واحدة و نظام ذو وشيعتي استقبال و هذا باستعمال نموذجين تسلسلي- تسلسلي و تسلسلي- تفرعي. هذا لتقييم ايجابيات و سلبيات هذه التكنولوجيا مثل كفاءة النقل تيار و جهد البطارية مدة الشحن . محاكاة هذا النظام انجز في بيئة

Matlab/simulink

الكلمات المفتاحية

موج, الحقل الكهرومغناطيسي, وشيعة استقبال, مركبة كهربائية, موحد, الشحن اللاسلكي

Résumé :

Dans ce travail, nous avons modélisé et simulé le système de charge sans fil d'un véhicule électrique pour deux configurations (une seule et deux bobines réceptrice) et pour deux topologies Série-Série et Série-parallèle, le but est de connaitre les avantages et les inconvénients de chaque étude, tels que l'efficacité de transmission, la tension de la batterie, le courant de la batterie et le temps de recharge. La simulation de ce système a été réalisée par MATLAB/Simulink.

Mots clés :

Charge sans fil, véhicule électrique, bobines réceptrices, recharge inductive, redresseur, onduleur.

Abstract:

In this work we investigate the modeling and simulation of a wireless charging system for an electric vehicle using two configurations (one then two receiver coils) and using two topologies SS and SP. The objective is to determine the advantages and inconvenient of each one such as transmission efficiency, the battery voltage, the battery current and the amount of charging time. The simulation of this system was conducted using MATLAB/Simulink.

Keywords:

Wireless charging, electric vehicle, receiver coils, inductive charging, rectifier inverter.