

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHYA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Electrotechnique

N° : ...../2024

**Mémoire de Fin d'Etude**

En vue d'obtention du diplôme de :

**MASTER en Électrotechnique**

Spécialité : Électrotechnique industrielle

**Thème**

**Mise en place d'un outil de gestion d'énergie optimale pour la recharge sans contact des véhicules électriques**

Présenté Par : - Sara BOUANANE

Encadré Par : Dr. Tarik HACIB

-Roumeysa SEKHOUNE

Date de soutenance : 30/06/2024

**Jury de soutenance**

Président : Nabil ikhlef

Grade : Professeur

Univ MSB Jijel

Encadreur : Tarik Hacib

Grade : Professeur

Univ MSB Jijel

Examineur : Abdelghani Kimouche

Grade : MCA

Univ MSB Jijel

**Promotion 2023/2024**

# *Remerciements*

# Remerciement

*On remercie dieu de tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Pr. Tarik Hacib, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa gentillesse et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Notre remerciement s'adresse aux ingénieurs de laboratoire du facultés science et technologies pour leurs aide pratique et leurs soutien moral et ses encouragements.*

*Nous tenons à remercier nos professeurs de la filière électrotechnique, qui ont perfectionnés notre connaissances théoriques et pratiques durant la période de la formation.*

# *Dédicaces*

## إهداء

"الحمد لله الذي ما ختم جهده ولا تم سعي إلا بفضلہ"

أهدي ثمرة جهدي المتمثلة في هذا العمل

إلى سندي الأول والدائم في الحياة أبي الذي لم يبخل علينا يوماً بعطفه وحنانه وعطائه

إلى أُمِّي ومأمني وأمانِي معلمتي في الحياة شكراً لأنك تزرعين الأمل في قلبي كلما إنطفت

إلى أختي سيرين ومريم صديفتاي الدائمتان والأبديتان

إلى أخي وسيم ومحمد بقدر حبي لكما أسأل الله أن ينير طريقكما

إلى من لم تفارقني وعواته طوال مسيرتي الدراسية

إلى عائلتي وأحبتي وأصدقائي و متم لي شيئاً جميلاً

كما لا أنسى بالذكر زميلتي في هذا العمل سارة

روميصة

## إهداء

وَأَخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنْ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ  
الحمد لله عند البدء وعند الختام، فما تناهى درب، ولا ختم جهد، ولا تم سعي إلا بفضلته  
ها أنا اليوم اختتم مسيرتي الدراسية وكلي فخرا، بإهداء إلى  
من تستقبلني بابتسامة وتودعني بدعاء، إلى داعمتي الأولى والأبدية، اهديك هذا الإنجاز الذي لولا  
تضحياتك لما كان له وجود 'أمي'  
من خاتمه الكلمات وعبرت عنها المواقف، إلى الرجل العظيم 'أبي'  
التي كانت منبع الدعوات والتحفيز 'جدتي' رحمها الله  
من قيل فيهم 'سنشد عضدك بأخيك'  
من ساندني بكل حب عند ضعفي  
رفيقتي وزميلتي في هذا المشوار 'روميسة'  
صديقات السنين  
وأخيرا من قال 'أنا' لها نالها وإني رغم الصعاب نلتها

## سارة

# *Table des matières*

# Table des matières

Remerciements .....	i
Dédicaces .....	ii
Table des matières .....	iv
Liste des figures .....	vii
Liste des tableaux .....	ix
Introduction générale.....	1

## Chapitre I : Etat de l'art sur la recharge des véhicules électriques

I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique.....	3
I.3. Véhicules électriques .....	4
I.4. Recharge des véhicules électriques.....	4
I.5. Principe de transfert d'énergie sans fil.....	5
I.6. Techniques du transfert d'énergie sans fil .....	5
I.6.1. Systèmes à champs proches .....	6
I.6.1.1. Transfert par couplage inductive .....	6
I.6.1.2. Transfert par couplage inductif non résonnant .....	8
I.6.1.3. Transfert par couplage capacitif .....	12
I.6.2. Systèmes à champs lointain.....	13
I.6.2.1. Micro-ondes .....	13
I.6.2.2. Lasers .....	13
I.7. Conclusion .....	14
Références .....	15

## Chapitre II : Recharge des véhicules électriques sans fil

II .1. Introduction .....	16
II .2. Recharge par induction pour les véhicules électriques .....	16
II .3. Système de recharge sans contact .....	17
II .3.1. Recharge statique.....	17
II .3.2. Recharge dynamique .....	19
II .4. Recharge Hybride.....	23

II .4.1. Définition de voiture hybride .....	23
II .4.2. Versions de voitures hybrides.....	23
II.4.2.1. Véhicule électrique non rechargeable « full hybrid ».....	23
II.4.2.2. Véhicule électrique rechargeable (mix entre full hybride et électrique) .....	24
II.4.2.3. Véhicule hybride doux « Mild hybrid ».....	24
II .5. Conclusion.....	25
Références .....	26

### **Chapitre III : Modélisation des systèmes de transfert d'énergie sans fil**

III.1. Introduction .....	28
III.2. Principe de fonctionnement d'un lien inductif.....	28
III.3. Méthodes de résolution .....	28
III.3.1. Méthodes analytiques .....	29
III.3.1.1. Méthode de séparation des variables .....	29
III.3.2. Méthodes semi-analytiques .....	29
III.3.2.1. Méthodes des intégrales des frontières .....	29
III.3.2.2. Méthode des circuits couplés .....	29
III.3.3. Méthodes numériques.....	29
III.3.3.1. Méthode des différences finies .....	29
III.3.3.2. Méthode des volumes finis .....	30
III.3.3.3. Méthode des éléments finis.....	30
III.4. Modèle électromagnétique .....	30
III.4.1. Lien inductif entre deux spires .....	30
III.5. Conclusion.....	35
Références .....	36

### **Chapitre IV : Outil de gestion d'énergie dans un système de recharge sans contact**

IV.1. Introduction.....	37
IV.2. Problématique.....	37
IV.3. Explication générale du travail.....	37
IV.4. Matériels utilisés .....	38
IV.4.1. Carte Arduino Uno .....	38

IV.4.1.1. Définition de la carte Arduino Uno .....	38
IV.4.1.2. Composition de la carte Arduino Uno .....	39
IV.4.1.3. Caractéristiques techniques.....	40
IV.4.1.4. Programmation de la carte Arduino Uno .....	41
IV.4.2. Afficheur LCD (Liquid Crystal Display) .....	41
IV.4.2.1. Définition .....	41
IV.4.2.2. Caractéristiques techniques.....	42
IV.4.2.3. Utilisation d'un LCD sous Arduino .....	42
IV.4.3. Capteur ultrasonique HC-SR04 .....	43
IV.4.3.1. Définition .....	43
IV.4.3.2. Description du capteur ultrason .....	44
IV.4.3.3. Principe de fonctionnement .....	45
IV.4.3.4. Connexion d'un capteur à une carte Arduino .....	47
IV.4.4. Relais électrique 5V (SRD-05VDC-SL-C) .....	47
IV.4.4.1. Définition .....	47
IV.4.4.2. Principe de fonctionnement .....	48
IV.4.5. Fils de connexion.....	49
IV.4.6. Bobines .....	50
IV.4.6.1. Bobine primaire (émettrice).....	50
IV.4.6.2. Bobine secondaire (réceptrice).....	51
IV.5. Réalisation du projet.....	52
IV.5.1. Schéma réalisé .....	52
IV.5.2. Résultats obtenus .....	53
IV.6. Conclusion.....	56
Références .....	57
Conclusion générale .....	58
Résumé .....	59

# Liste des Figures

<b>Figure I.1.</b> Exemple de TESHF.....	3
<b>Figure I. 2.</b> Avancées technologiques les plus pertinentes.....	4
<b>Figure I. 3.</b> Borne de recharge.....	5
<b>Figure I. 4.</b> Schéma du principe du TESHF.....	5
<b>Figure I. 5.</b> Technique générale de TESHF.....	6
<b>Figure I. 6.</b> Transfert par couplage inductive .....	7
<b>Figure I. 7.</b> Circuit de base d'un STEF à couplage inductif.....	7
<b>Figure I. 8.</b> Schématisation d'un lien inductif sans pertes, non résonnant.....	8
<b>Figure I. 9.</b> Simulation sans pertes à couplage partiel ( $L=1\text{mH}$ ), effet du coefficient de couplage ( $k$ ).....	9
<b>Figure I. 10.</b> Schématisation d'un lien inductif avec pertes, non résonnant.....	10
<b>Figure I. 11.</b> Simulation d'un lien avec pertes ( $L=1\text{mH}$ , $R=0.5\Omega$ ), effet du coefficient de couplage ( $k$ ).....	10
<b>Figure I. 12.</b> Simulation d'un lien avec pertes ( $k=0.1$ , $R=0.5\Omega$ ), effet des inductances ( $L$ ). ..	11
<b>Figure I. 13.</b> Simulation d'un lien avec pertes ( $k=0.1$ , $L=1\text{mH}$ ), effet des résistances ( $R$ ). ...	12
<b>Figure I. 14.</b> Structure du système à couplage capacitif.....	12
<b>Figure I. 15.</b> Représentation d'un satellite solaire qui pourrait envoyer de l'énergie par micro-ondes à un vaisseau spatial ou à une surface planétaire.....	13
<b>Figure I. 16.</b> Faisceau laser centré sur un panneau de cellules photovoltaïques fournit suffisamment de puissance à un modèle réduit d'avion léger pour qu'il puisse voler.....	14
<b>Figure II.1.</b> Recharge sans contact des véhicules électriques.....	17
<b>Figure II. 2.</b> Recharge du bus électrique par induction. Bobines situées sous la route et dans le plancher du bus et batteries sur le toit du véhicule.....	17
<b>Figure II. 3.</b> Secondaire du système Primove développé par Bombardier.....	18
<b>Figure II. 4.</b> Système de transfert sans fil d'électricité adapté au transport par train.....	18
<b>Figure II. 5.</b> Système de transfert sans fil d'électricité adapté aux voitures électriques.....	19
<b>Figure II. 6.</b> Différents types de pistes.....	19
<b>Figure II. 7.</b> Projet Serpentine EPFL.....	21
<b>Figure II. 8.</b> Système développé par Renault-Supélec.....	21
<b>Figure II. 9.</b> Piste FABRIC en Italie.....	22
<b>Figure II. 10.</b> Nouvelle Renault CLIO E-TECH Hybrid « full hybrid ».....	23
<b>Figure II. 11.</b> Voiture hybride rechargeable.....	24
<b>Figure II. 12.</b> Voiture électrique « Mild hybrid ».....	25
<b>Figure III. 1.</b> Lien inductif entre deux spires placées arbitrairement dans l'espace (désalignement angulaire et axial).....	31
<b>Figure III. 2.</b> Modèle électrique équivalent à deux spires couplées.....	31
<b>Figure III. 3.</b> Coefficient de couplage en fonction du désalignement latéral.....	33
<b>Figure III. 4.</b> Coefficient de couplage en fonction du désalignement latéral et angulaire.....	33
<b>Figure III. 5.</b> Coefficient de couplage en fonction du désalignement angulaire.....	34
<b>Figure III. 6.</b> Coefficient de couplage en fonction du désalignement angulaire et latéral.....	34
<b>Figure IV. 1.</b> Carte Arduino Uno.....	39
<b>Figure IV. 2.</b> Présentation d'Arduino.....	39
<b>Figure IV. 3.</b> Constitution d'Arduino Uno.....	40

<b>Figure IV. 4.</b> Caractéristiques techniques de la carte Arduino Uno.....	40
<b>Figure IV. 5.</b> Afficheur LCD.....	42
<b>Figure IV. 6.</b> Connexion d'écran LCD avec Arduino. ....	43
<b>Figure IV. 7.</b> Capteur ultrason HC-SR04. ....	44
<b>Figure IV. 8.</b> Mode de fonctionnement d'un capteur ultrason.....	46
<b>Figure IV. 9.</b> Connexion du HC-SR04 à une carte Arduino. ....	47
<b>Figure IV. 10.</b> Relais électrique SRD-05VDC-SL-C.....	47
<b>Figure IV. 11.</b> Bornes d'un relais électrique. ....	48
<b>Figure IV. 12.</b> Connexion d'un relais à Arduino Uno.....	48
<b>Figure IV. 13.</b> Relais électrique en mode NO. ....	49
<b>Figure IV. 14.</b> Relais électrique en mode NC. ....	49
<b>Figure IV. 15.</b> Fils 20 cm Arduino. ....	50
<b>Figure IV. 16.</b> Bobine primaire. ....	51
<b>Figure IV. 17.</b> Bobine secondaire. ....	51
<b>Figure IV. 18.</b> Deux bobines utilisées pour le TESF, avec la LED allumée, indiquant un transfert d'énergie réussi.....	52
<b>Figure IV. 19.</b> Schéma du projet réalisé.....	52
<b>Figure IV. 20.</b> Station 1 en charge. ....	53
<b>Figure IV. 21.</b> Station 2 en charge. ....	54
<b>Figure IV. 22.</b> Station 1 et 2 en charge. ....	55
<b>Figure IV. 23.</b> Station 1 et 2 en repos. ....	55

## Liste des tableaux

<b>Tableau II. 1.</b> Gammes de puissance définies par la norme SAE J2954.....	22
<b>Tableau II. 2.</b> Classes de séparation définies par la norme SAE J2954.....	22

# *Introduction générale*

## Introduction générale

La transmission d'énergie sans fil est une technique permettant le transfert de l'énergie électrique sans avoir recours à un support matériel. Cette technique n'est plus considérée comme une idée nouvelle. En effet, au début du 20<sup>ième</sup> siècle, Nikola Tesla avait déjà réalisé une transmission d'électricité sans fil en utilisant l'induction électromagnétique. Tesla avait découvert que l'électricité pouvait être transmise non seulement à travers l'air mais aussi par la terre. Au cours de ses recherches, il était parvenu à allumer des lampes à une distance significative. Dans les techniques de champ proche, ou non radiatives, la puissance est transférée sur de courtes distances par des champs magnétiques, utilisant un couplage inductif entre des bobines de fil. Ces découvertes ont jeté les bases des avancées modernes dans la transmission d'énergie sans fil, ouvrant la voie à de nombreuses applications dans divers domaines technologiques [1].

Cependant, la mise en œuvre d'un système de recharge sans fil n'est pas sans défis. L'efficacité énergétique de la transmission d'énergie sans fil est un point crucial, car les pertes peuvent être plus importantes que dans les systèmes filaires traditionnels. De plus, le coût d'installation des infrastructures de recharge sans fil est actuellement élevé, ce qui peut freiner leur adoption à grande échelle. La standardisation des technologies et des protocoles de communication entre les différentes marques de véhicules et les stations de recharge est également nécessaire pour assurer une interopérabilité et une compatibilité universelles [2].

Malgré ces défis, la recharge sans fil est en plein développement et suscite un intérêt croissant tant chez les constructeurs automobiles que chez les gestionnaires d'infrastructures. Elle représente une étape importante vers une adoption plus large des véhicules électriques, en rendant la recharge plus pratique, intuitive et intégrée à notre quotidien. À mesure que les technologies progressent et que les coûts diminuent, la recharge sans fil pourrait devenir une norme, transformant notre conception de la mobilité électrique et contribuant à un avenir plus durable [2].

Dans ce mémoire, nous nous essayons de développer un prototype intelligent qui assure une gestion optimale d'énergie dans un système de recharge sans fil pour véhicules électriques. Cependant, le défi principal réside dans la nécessité de transférer l'énergie avec une efficacité énergétique élevée tout en assurant la sécurité du matériel et des personnes à proximité. Bien que cette technologie soit explorée depuis environ une décennie, elle est encore au stade préliminaire. De nombreuses recherches académiques et industrielles sont axées sur l'amélioration de l'efficacité du transfert d'énergie, la réduction des interférences électromagnétiques, et l'optimisation des systèmes de gestion énergétique et thermique.

Ce travail de mémoire est composé de quatre chapitres dont le premier consiste à présenter l'état de l'art de la recharge sans contact et ces différentes techniques de transmission d'énergie sans fil. Il illustre aussi les différents types de couplages. Le deuxième chapitre à examiner en détail les divers aspects de la recharge inductive, mettant en lumière une variété de projets novateurs provenant d'entreprises et de laboratoires de recherche à travers le monde. Le troisième chapitre sera consacré à présenter un système de transfert d'énergie sans fil par un lien inductif entre deux bobines. Puis, nous procéderons à sa modélisation électromagnétique en utilisant des méthodes analytiques. Enfin, le dernier chapitre sera dédié à la réalisation expérimentale d'un prototype de recharge sans contact des véhicules électriques, en mettant l'accent sur une gestion optimale de l'énergie.

# *Chapitre I*

**Etat de l'art sur la recharge des véhicules  
électriques**

# Chapitre I

## Etat de l'art sur la recharge des véhicules électriques

### I.1. Introduction

Le Transfert d'Énergie Sans Fil (TESF) est une technologie prometteuse qui peut être utilisée dans plusieurs secteurs, les estimations indiquent que le TESF pourrait devenir l'industrie la plus riche dans les dix prochaines années.

Ce chapitre donne l'état de l'art de la recharge sans fil, un court historique qui met en avant les avancées technologiques les plus pertinentes, les différentes techniques de transmission d'énergie sans fil, tout en illustrant les différents types de couplages [1].

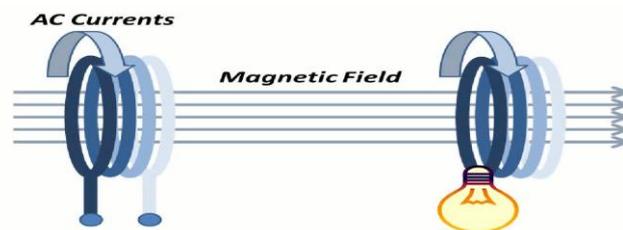


Figure I.1. Exemple de TESF.

### I.2. Historique

En 1825, William Sturgeon invente l'électroaimant, un fil conducteur enroulé autour d'un noyau de fer. Le principe de l'induction électromagnétique, un champ magnétique fluctuant induit un courant électrique dans un fil électrique, est découvert par Michael Faraday en 1831. Combinant ces deux découvertes, Nicholas Joseph Callan est le premier en 1836 à faire la démonstration d'une transmission d'une énergie électrique sans fil. L'appareil à bobine d'induction de Callan est constitué de 2 bobines isolées, appelées bobinages primaire et secondaire, placées autour d'un noyau de fer. Une batterie connectée par intermittence au primaire induit une tension dans le secondaire, provoquant une étincelle.

Dans une bobine d'induction ou un transformateur électrique, qui peut avoir un cœur ferreux ou de l'air, la transmission d'énergie se fait par simple couplage électromagnétique aussi connu par le terme induction mutuelle. Avec cette méthode, il est possible de transmettre de l'énergie sur de grandes distances. Cependant, pour diriger l'énergie dans la bonne direction, les deux bobines doivent être placées suffisamment proches.

En 1864, James Clerk Maxwell réalise une modélisation mathématique du comportement des radiations électromagnétiques. En 1888, Heinrich Rudolf Hertz réalise une transmission sans fil d'ondes radio, validant les modèles mathématiques de Maxwell. L'appareil de Hertz est considéré comme le premier transmetteur radio. Quelques années plus tard, Guglielmo Marconi améliore le transmetteur, en

y ajoutant un conducteur élevé et une connexion à la terre. Ces deux éléments peuvent être retrouvés dans les travaux de Benjamin Franklin en 1749 et de Mahlon Loomas en 1864 [2].

Nikola Tesla investigue aussi dans la transmission radio mais au contraire de Marconi, Tesla conçoit son propre transmetteur, d'une puissance instantanée cinq fois supérieure à celui de ses prédécesseurs. Tous ces dispositifs utilisent au minimum quatre circuits de résonance, deux pour l'émetteur et deux pour le récepteur. Tandis que les techniques sans fil se développent au début du XXe siècle, des recherches sont effectuées sur des méthodes de transmission alternatives. L'objectif était de générer un effet localement et de le détecter à distance. Au St. Louis World's Fair (1904), un prix est offert pour l'alimentation à une distance de 30 mètres d'un moteur de 0.1 cheval (75 W) [3].



a. Faraday et l'induction magnétique

b. Sturgeon invente l'électroaimant

c. Tesla et ampoule allumée

Figure I. 2. Avancées technologiques les plus pertinentes.

### I.3. Véhicules électriques

Les Voitures Electriques (VE) utilisent une technologie qui permet de stocker de l'énergie électrique dans une batterie rechargeable, qui alimente ensuite un ou plusieurs moteurs électriques. Les batteries utilisées dans les VE sont généralement des batteries Lithium-Ion. Elles offrent une densité énergétique élevée et une durée de vie importante [4]. Le groupe de batteries fournit l'énergie provenant :

- Soit par les câbles dans les bornes de recharge.
- Soit par la recharge sans contact.

### I.4. Recharge des véhicules électriques

Une borne de recharge (voir la figure I.3) se présente généralement sous la forme d'un appareil fixe raccordé directement à un tableau de distribution électrique ou, parfois, branché sur une prise de courant. La borne comprend un ou plusieurs câbles de charge munis d'une prise mobile qui rappelle un pistolet à essence et s'utilise d'une manière analogue : il suffit de la brancher au socle de recharge du VE pour recharger la batterie. La borne est équipée de voyants qui indiquent si le VE est branché et s'il est en

recharge. Elle peut aussi comprendre un bouton qui commande ou arrête la recharge. Certaines bornes intègrent des fonctionnalités additionnelles : compteur d'énergie fournie, système de paiement électronique, contrôle d'accès par carte, accès Internet, ... etc [5].



Figure I. 3. Borne de recharge.

### I.5. Principe de transfert d'énergie sans fil

La transmission d'énergie sans fil est généralement représentée par le principe du transformateur. Le système est composé de deux bobines, l'une émettrice et l'autre réceptrice qui vont jouer le rôle d'enroulement primaire et secondaire du transformateur (Figure I.4). Les bobines sont électriquement isolées l'une de l'autre, le transfert d'énergie se fait par couplage magnétique.

La bobine émettrice est alimentée sous une tension alternative, le courant électrique qui circule dans la bobine primaire génère un champ magnétique, qui à son tour génère par induction électromagnétique une tension et un courant électriques aux bornes de la bobine réceptrice. La tension et le courant électriques générés vont être transmis à une charge [1].

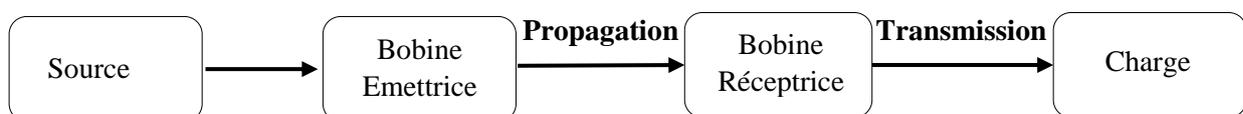


Figure I. 4. Schéma du principe du TESF.

### I.6. Techniques du transfert d'énergie sans fil

Pour réaliser le TESF, il est nécessaire d'avoir une source d'alimentation continu (tout courant électrique continu est à l'origine de la création d'un champ magnétique) qui sera convertie en un courant alternatif à haute fréquence.

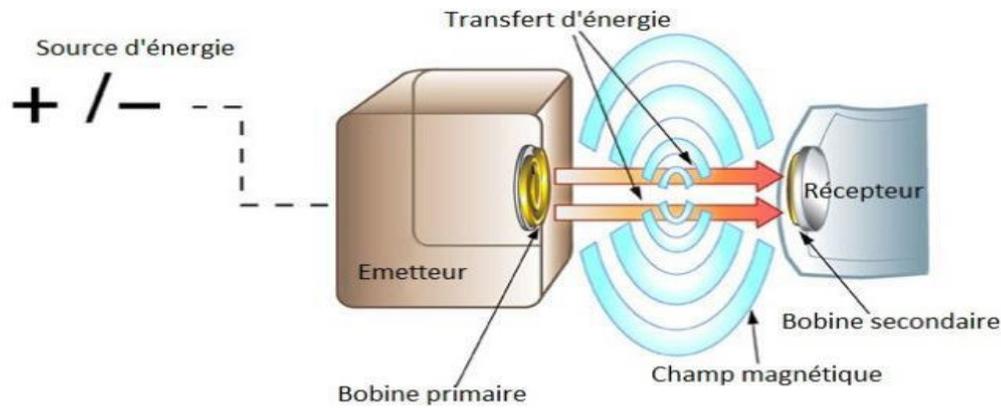


Figure I. 5. Technique générale de TEF.

Le rendement dépend des positions respectives de la bobine émettrice et de la bobine réceptrice, c'est un critère important dont il faut tenir en compte afin de déterminer le choix entre les différentes technologies, qui se déclinent en deux modes de systèmes : des systèmes à champs proches et des systèmes à champs lointains.

Les systèmes à champs proches permettent la transmission d'énergie sur une petite distance qui va de quelques centimètres à quelques mètres, on y trouve un couplage inductif et un couplage inductif non résonnant. Les systèmes à champs lointains par contre permettent la transmission sur une distance plus élevée [1].

## I.6.1. Systèmes à champs proches

### I.6.1.1. Transfert par couplage inductive

Un système typique, de transfert de puissance inductif, consiste en un couplage magnétique total entre une bobine secondaire (antenne réceptrice) et une bobine primaire (antenne émettrice) parcourue par un courant alternatif. Les deux bobines forment un transformateur sans noyau, où le couplage est déterminé par un facteur de couplage  $K$ . Un courant alternatif circulant dans la bobine primaire produit un champ magnétique alternatif, suivant la loi d'Ampère. Le flux magnétique variable au niveau de la bobine secondaire induit une force électromotrice par la loi d'induction de Faraday, d'où l'appellation TEI (Transfert d'Énergie Inductive) dans la littérature [6].

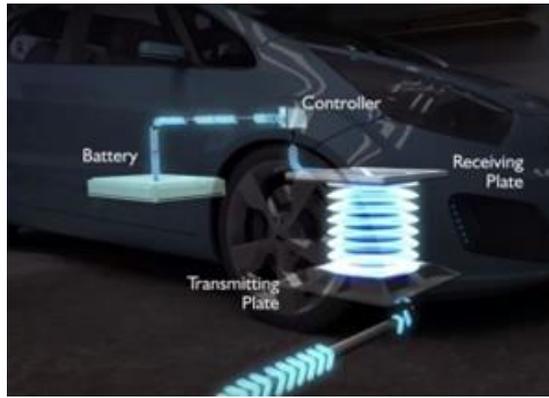


Figure I. 6. Transfert par couplage inductive [7].

L'efficacité, définie comme le rapport de la puissance de la bobine secondaire à la puissance de la bobine primaire, est en grande partie déterminée par les pertes résistives et le facteur de couplage entre les deux bobines. Le facteur de couplage  $k$  correspond à un ratio de flux transmis d'une bobine à l'autre. Dans le meilleur des cas il est de 1, ce qui signifie que la totalité des lignes de flux sont captées par la deuxième bobine, il peut être calculé avec l'équation (I.1) et dépend de l'inductance mutuelle  $M$  (en H) et des inductances propres (auto-inductances) des bobines émettrices et réceptrices  $L_1$  et  $L_2$  (en H) respectivement [6].

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (\text{I.1})$$

Un système TEI de base est illustré à la figure I.7 et contient la source alternative, les deux bobines  $L_1$  et  $L_2$ , et la charge équivalente  $R_L$  qui représente le redresseur, le régulateur DC/DC et la charge DC.

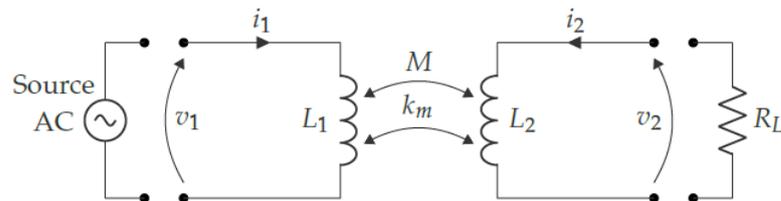


Figure I. 7. Circuit de base d'un STEF à couplage inductif.

Si la distance entre les bobines augmente, l'inductance mutuelle diminuera rapidement, ce qui entraînera un facteur de couplage  $k$  inférieur. Cette réduction significative du couplage avec l'augmentation de la distance indique que le transfert d'énergie via couplage inductif ne peut couvrir que de petites distances.

L'efficacité (rendement) du lien est essentielle et doit être maximisée à tout moment. Il décrit la relation entre la puissance de la bobine secondaire par rapport à la puissance de la bobine primaire. Elle est entièrement déterminée par le facteur de couplage en combinaison avec les facteurs de qualité des deux bobines.

$$n = \frac{x}{2+x+2\sqrt{1+x+Q_2^2}} \quad (\text{I.2})$$

Avec :  $Q_i = \frac{\omega L_i}{R_i}$  est le facteur de qualité de la bobine « i » et  $x = k \cdot Q_1 \cdot Q_2$ .

**I.6.1.2. Transfert par couplage inductif non résonnant**

En première approche, on considère un lien non résonnant, l'étude devra nous permettre de voir les paramètres qui imposent les contraintes les plus fondamentales sur le fonctionnement d'un lien inductif [8].

**a. Lien inductif sans pertes**

Les résistances des bobines sont négligées, les seuls éléments du modèle, figure I.8, sont les deux inductances des bobines  $L_1=L_2$ , l'inductance mutuelle  $M=k L_1$  et la résistance de charge  $R_c=10 \Omega$ .

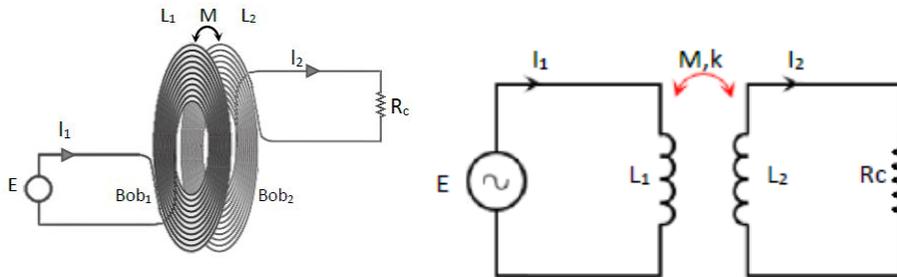


Figure I. 8. Schématique d'un lien inductif sans pertes, non résonnant.

La simulation de ce lien sur large spectre de fréquence, [0.1-5] kHz, à l'aide des équations (I.3) et (I.4) et en faisant varier ses paramètres  $L$  et  $k$ , donne les résultats suivants.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & -j\omega M \\ j\omega M & (R_2 + j\omega L_2) + Z_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \tag{I.3}$$

$$\eta = G = \frac{P_2}{P_1} = \frac{|I_2|^2 \cdot \Re\{Z_c\}}{|I_1|^2 \cdot \Re\{Z_{in}\}} = \frac{R_c}{R_1 \cdot \frac{L_2^2}{M^2} \cdot (R_2 + R_c) \cdot \left[1 + \frac{R_1(R_2 + R_c)}{\omega^2 M^2}\right]} \tag{I.4}$$

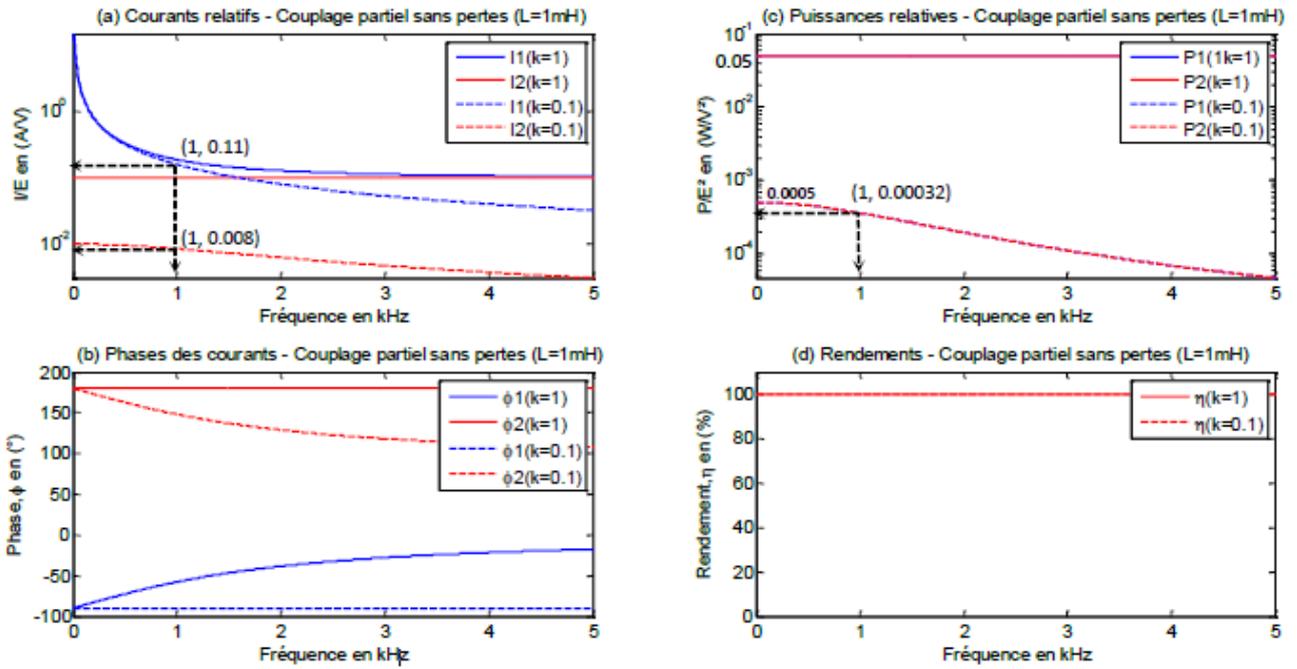


Figure I. 9. Simulation sans pertes à couplage partiel ( $L=1\text{mH}$ ), effet du coefficient de couplage ( $k$ ).

La figure I.9 montre la comparaison entre deux liens parfaits de mêmes inductances ( $1\text{mH}$ ) mais ayant deux couplages différents : (total  $k \approx 1$  et partiel  $k=0.1$ ).

On remarque qu'à faibles couplages partiels ( $k=0.1$ ), le rendement reste unitaire avec la fréquence. Cependant, les puissances transmises (traits pointillés, Figure I.9.c, sont plus faibles que celles du couplage total et diminuent avec l'augmentation de la fréquence.

Par exemple pour lien de  $E=25\text{V}$  et  $f=1\text{kHz}$ ,  $k=0.1$ , nous obtenons une puissance transmise de  $200\text{mW}$  qui peut être insuffisante ou inutilisable pour des applications concernées.

- Le courant primaire est tel que :  $\frac{I_1}{E}=0.11 \Rightarrow I_1 = 0.11 E = 2.75\text{ A}$
- Le courant secondaire est tel que :  $\frac{I_2}{E} = 0.008 \Rightarrow I_2 = 0.008 E = 0.2\text{ A}$
- Les puissances identiques :  $\frac{P_2}{E^2} = \frac{P_1}{E^2} = 0.00032 E^2 = 0.2\text{ W}$

Pour rendre le lien utilisable en faibles couplages, il est nécessaire d'augmenter les tensions et courants de la source. Par exemple, pour obtenir  $P_2=10\text{W}$  sous  $f=1\text{kHz}$ , et  $k=0.1$  alors :

- La tension requise de la source est telle que  $\left(\frac{P_2}{E^2} = 0.00032\right) \Rightarrow E \approx 177\text{ V}$
- Le courant secondaire à la charge  $I_2$  est tel que  $\left(\frac{I_2}{E} = 0.008\right) \Rightarrow I_2 = 1.41\text{ A}$
- Le courant primaire  $I_1$  est tel que  $\left(\frac{I_1}{E} = 0.11\right) \Rightarrow I_1 = 19.47\text{ A}$

Donc, les faibles couplages (grandes distances et/ou les désalignements), soit ils dégradent la puissance transmise sous tensions données, soit ils imposent de fortes contraintes sur les tensions et/ou les courants que les sources doivent délivrer.

**b. Lien inductif avec pertes**

Chacune des bobines du lien est modélisée par une inductance 1mH et une résistance 0.5Ω en série, figure I.10. La résistance sera supposée indépendante de la fréquence. En réalité, suite aux effets de peau et de proximité, la résistance augmente avec la fréquence.

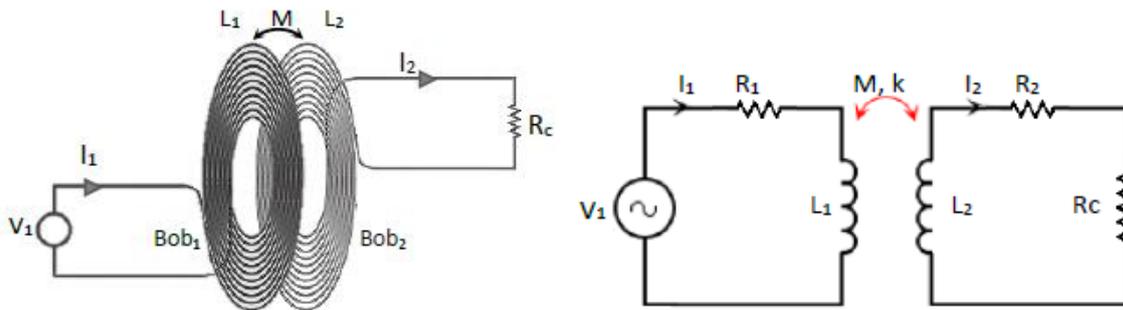


Figure I. 10. Schématique d'un lien inductif avec pertes, non résonnant.

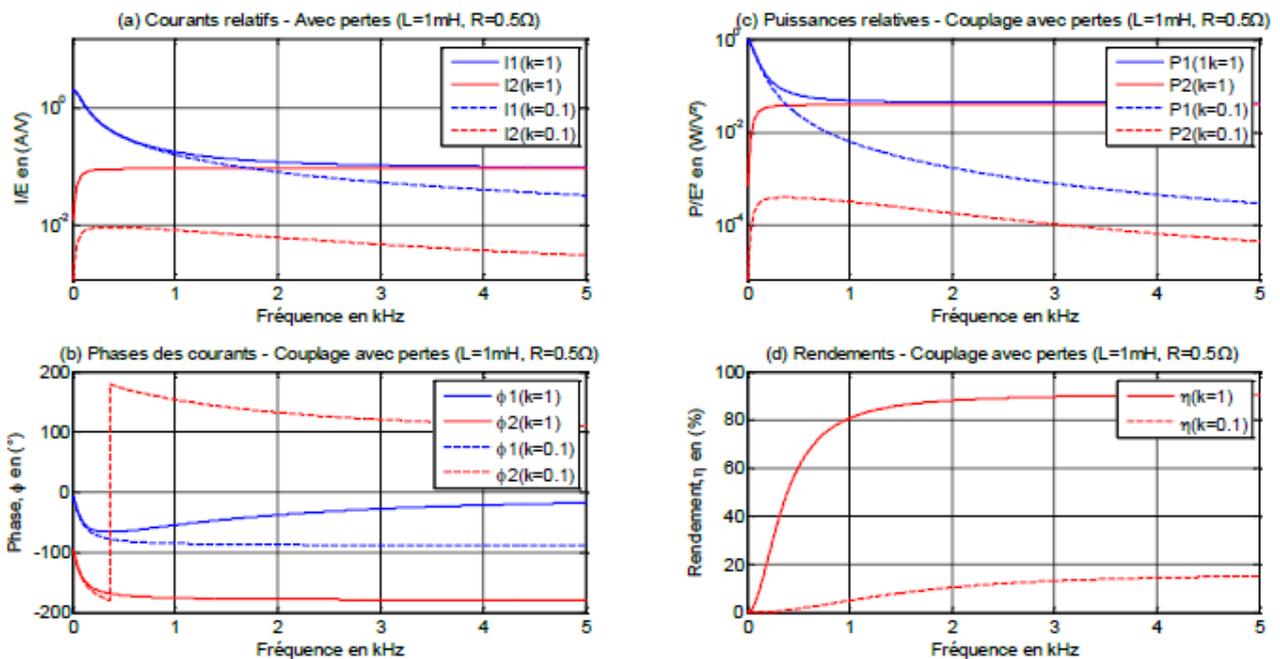


Figure I. 11. Simulation d'un lien avec pertes (L=1mH, R= 0.5Ω), effet du coefficient de couplage (k).

La figure I.11 montre une simulation d'un lien avec pertes (1mH, 0.5Ω) et une comparaison entre deux couplages différents : (total  $k \approx 1$  et partiel  $k=0.1$ ).

La prise en compte des résistances des bobines change complètement l'aspect des courbes. Les puissance et courants, même du couplage total, ne sont plus vraiment identiques. En basse fréquence, le rendement est faible car l'impédance dominante est résistive ( $R_1 \gg \omega L_1$ ). En HF, le rendement en

couplage total ( $k=1$ ) n'est plus unitaire ( $\approx 90\%$ ), cette baisse par rapport au cas sans pertes est une conséquence de la dissipation dans les résistances des bobines.

La réduction du couplage ( $k=0.1$ ) entraîne des chutes en courants, en puissances et en rendement (traits pointillés). La puissance non transmise à la charge est dissipée, surtout dans la résistance  $R_1$  de la bobine primaire puisque son courant  $I_1$  est beaucoup plus intense que celui  $I_2$  dans la bobine secondaire et ce le long de tout le spectre des fréquences.

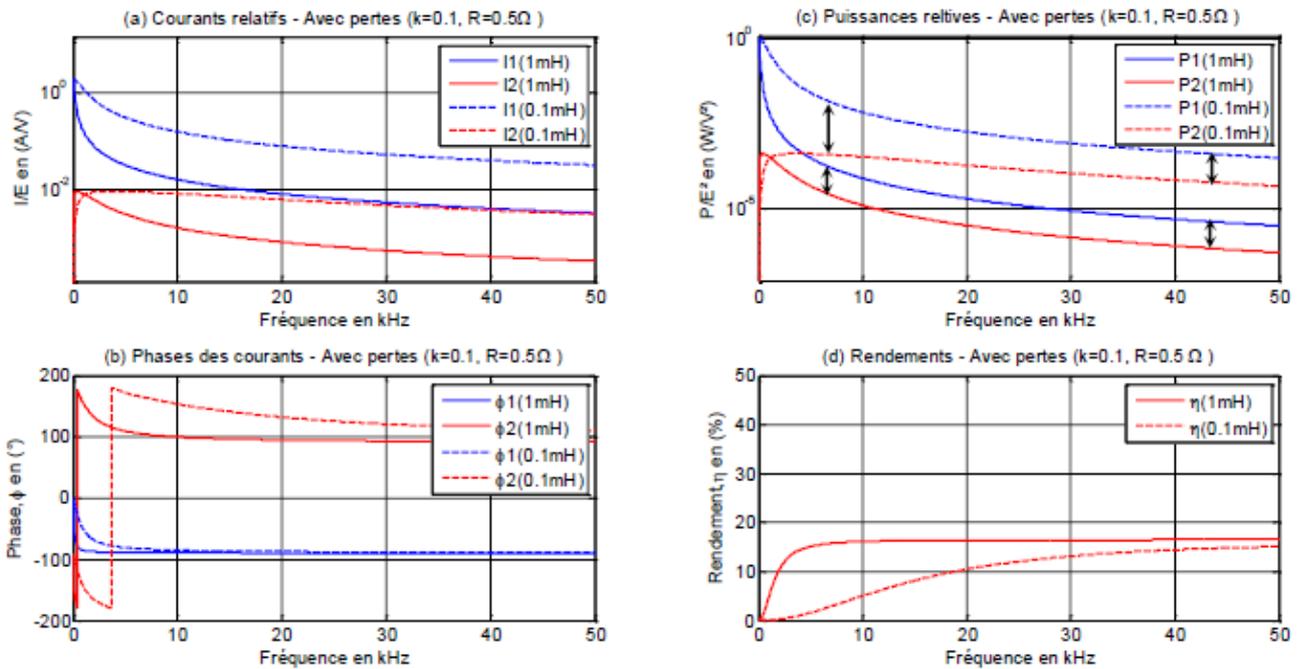


Figure I. 12. Simulation d'un lien avec pertes ( $k=0.1, R= 0.5\Omega$ ), effet des inductances ( $L$ ).

Dans la figure I.12, l'effet de la valeur de l'inductance est simulé. Une faible inductance entraîne généralement l'augmentation des courants et des puissances et la diminution du rendement le long des basses fréquences. Ceci est en fait consécutive à la faible partie inductive de l'impédance en basse fréquence, qui entraîne l'élévation des courants et par conséquent l'élévation des dissipations dans les résistances des bobines. Le rendement maximal peut être obtenu en augmentation la fréquence, alors l'impédance inductive augmente, les courants et les dissipations dans les résistances diminuent.

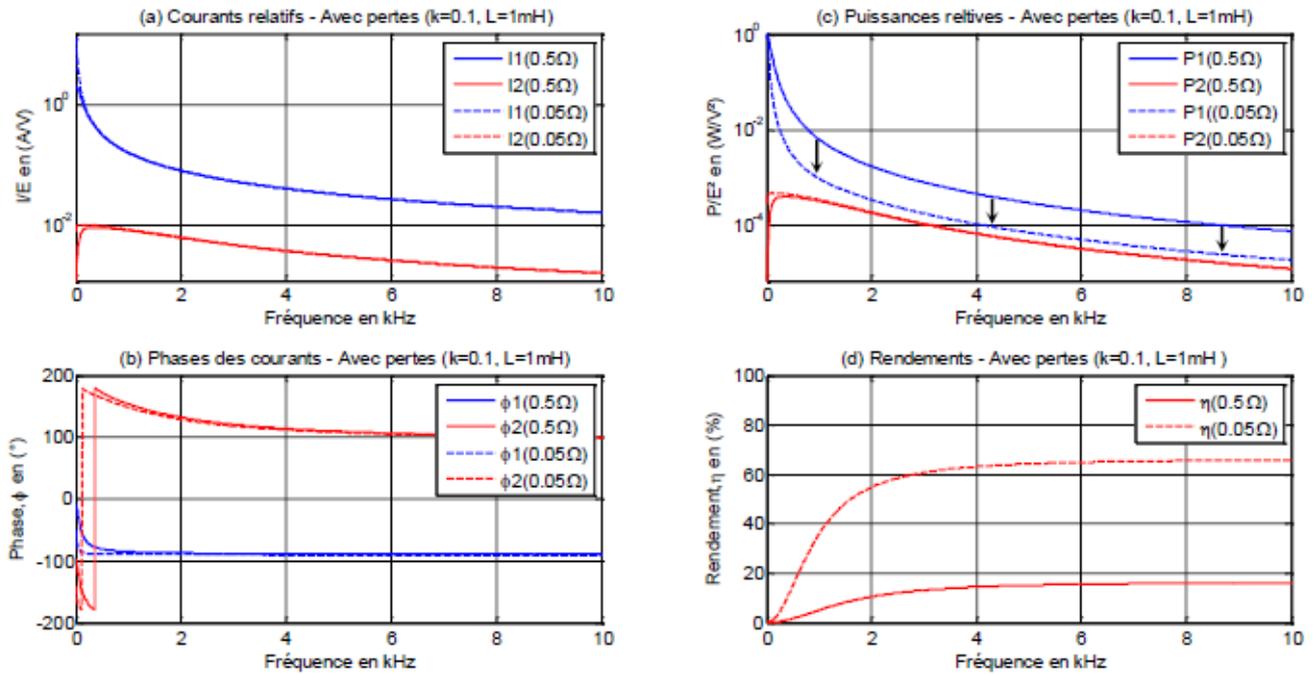


Figure I. 13. Simulation d'un lien avec pertes ( $k=0.1, L=1\text{mH}$ ), effet des résistances (R).

Dans la figure (I.13), l'effet de la valeur de résistance des bobines est simulé. Une faible résistance n'affecte pas significativement les valeurs des courants  $I_1$  et  $I_2$ , Figure I.13.a mais augmente considérablement le rendement maximal, figure I.13.d. Cette amélioration est due à la baisse considérable de la puissance, non transmise, dissipée surtout dans la faible résistance de la bobine primaire, figure I.13.c, ayant le plus grand courant.

### I.6.1.3. Transfert par couplage capacitif

Le TESF par couplage capacitif consiste à séparer la source d'alimentation et la charge avec deux plaques parallèles, ces plaques agissent comme l'anode et la cathode d'un condensateur a plaques parallèles. L'énergie est transmise via un champ d'induction généré par le couplage des deux ensembles d'électrodes [1].

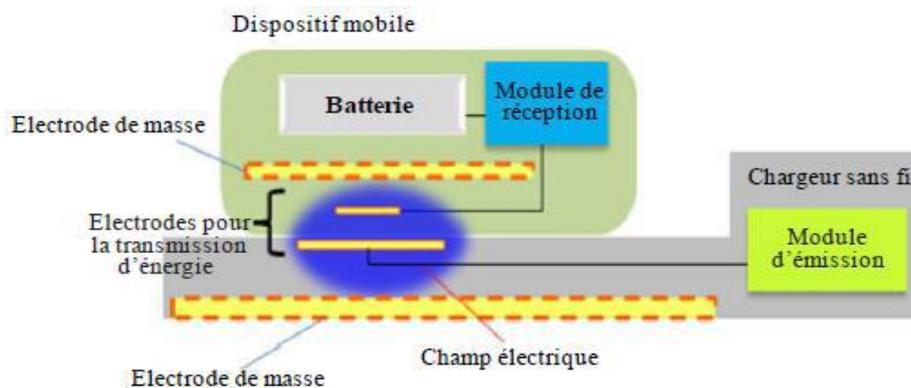


Figure I. 14. Structure du système à couplage capacitif.

Le système à couplage capacitif présente des avantages [1] :

- L'électrode utilisée entre l'émetteur et le récepteur du système est mince ce qui permet de l'intégrer dans des dispositifs mobiles de faible épaisseur.
- La température ne s'élève pas dans la zone de transmission d'énergie ce qui signifie que la batterie est protégée de la chaleur même si elle est placée à proximité.
- Le niveau d'émission du champ électrique est faible en raison de la structure du système de couplage. Le champ électrique émane des électrodes destinées à la transmission d'énergie.

## I.6.2. Systèmes à champs lointain

### I.6.2.1. Micro-ondes

La transmission de puissance par ondes radio peut être rendue plus directionnelle, permettant un faisceau de puissance à plus longue distance, avec des longueurs d'onde plus courtes de rayonnement électromagnétique, généralement dans la gamme des micro-ondes. Une rectenne peut être utilisée pour reconverter l'énergie micro-onde en électricité. Des rendements de conversion rectenna dépassant 95% ont été réalisés. Le faisceau de puissance utilisant les micro-ondes a été proposé pour la transmission de l'énergie des satellites d'énergie solaire en orbite vers la terre et le faisceau de puissance vers les vaisseaux spatiaux quittant l'orbite a été envisagée (Figure I.15) [9].

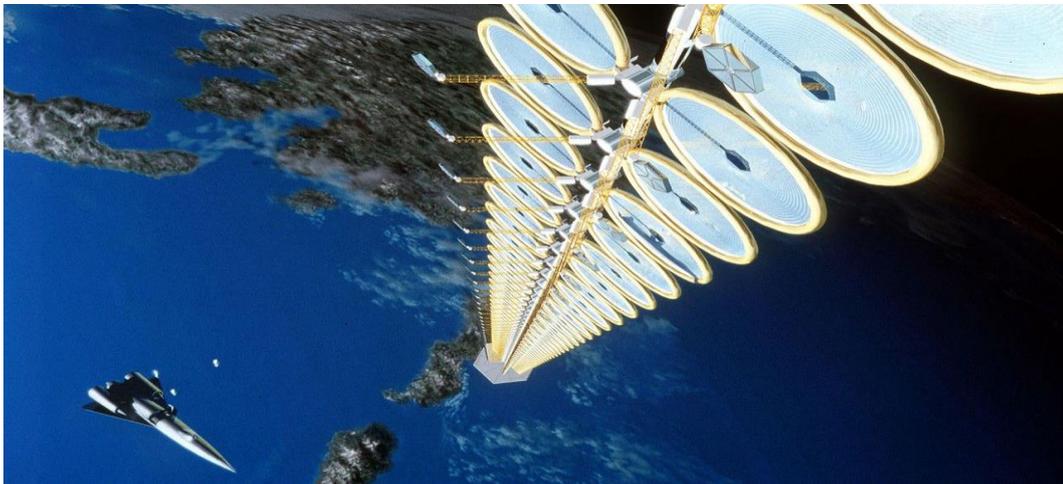


Figure I. 15. Représentation d'un satellite solaire qui pourrait envoyer de l'énergie par micro-ondes à un vaisseau spatial ou à une surface planétaire.

### I.6.2.2. Lasers

Dans le cas d'un rayonnement électromagnétique plus proche de la zone visible du spectre (0,2 à 2 micromètres), la puissance peut être transmise en convertissant l'électricité en un faisceau laser qui est reçu et concentré sur des cellules photovoltaïques (cellules solaires). Ce mécanisme est généralement connu sous le nom de « faisceau de puissance » parce que la puissance est transmise à un récepteur qui peut la convertir en énergie électrique. Au niveau du récepteur, des convertisseurs de puissance laser

photovoltaïques spéciaux optimisés pour la conversion de lumière monochromatique sont appliqués (Figure I.16) [9].

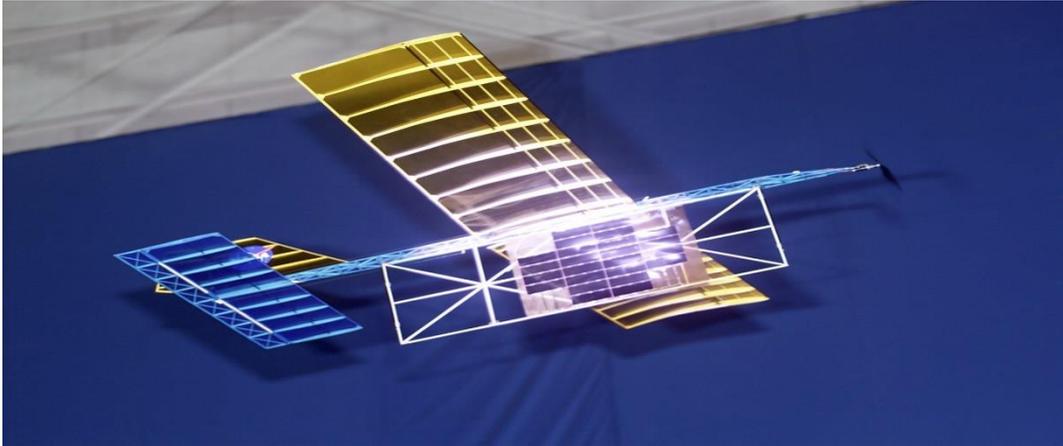


Figure I. 16. Faisceau laser centré sur un panneau de cellules photovoltaïques fournit suffisamment de puissance à un modèle réduit d'avion léger pour qu'il puisse voler.

## I.7. Conclusion

A travers ce chapitre, on a pu se familiariser avec le concept du transfert d'énergie sans fil à travers l'étude de l'état de l'art présentant les différentes techniques et systèmes de ce transfert. Ce qui nous amène à conclure qu'il existe plusieurs techniques pour la transmission d'énergie sans fil et que le choix de la méthode par rapport à une autre se fait selon les spécifications de l'application envisagée.

## Références

- [1] A. MOKRANI et S. CHAGOUR, *Modélisation et optimisation d'un dispositif de transfert de puissance à courte distance sans fil par induction électromagnétique*, 13 07 2022.
- [2] L. Éric, *Recharge sans contact des véhicules électriques*, 11 05 2020.
- [1] Y. Z. Sarah SADOUK, *Calcul par Eléments Finis (2D) des paramètres inductifs dans les dispositifs de transfert d'énergie électrique sans fil de structure axisymétrique*, 27 01 2021.
- [2] B. Abdelatif, *CHARGEUR DE BATTERIES SANS File POUR VOITURE ELECTRIQUE GERE PAR PIC 16F877.*, 2018.
- [3] C. S. Mokrani Amir, *Modélisation et optimisation d'un dispositif de transfert de puissance à courte distance sans fil par induction électromagnétique.*, p. 03, 13 07 2022.
- [4] [En ligne]. Available: <https://www.hyundai.com/fr/fr/voiture-electrique/faq-electrique/qu-est-ce-qu-une-voiture-electrique.html>.
- [5] «Bornes de recharge pour véhicules électriques,» Août 2015.
- [6] R. A. LEBAILI Mouatiz, «Transfert par couplage inductif,» *Etude d'un système de transfert d'énergie sans contact, par lien inductif, sous condition de résonance.*, p. 07 08, 03 07 2023.
- [7] [En ligne]. Available: <https://www.allnews.ch/content/points-de-vue/voitures-%C3%A9lectriques-l%E2%80%99immense-potentiel-de-la-recharge-sans-c%C3%A2ble>.
- [8] R. Adem et L. Mouatiz, «Etude théorique d'un lien inductif non résonnant,» *Etude d'un système de transfert d'énergie sans contact, par lien inductif, sous condition de résonance*, pp. 36-41, 03 07 2023.
- [9] C. S. Mokrani Amir, *Modélisation et optimisation d'un dispositif de transfert de puissance à courte distance sans fil par induction électromagnétique*, pp. 12-13, 13 07 2022.

# *Chapitre II*

## **Recharge des véhicules électriques sans fil**

## Chapitre II

### Recharge des véhicules électriques sans fil

#### II.1. Introduction

La recharge sans fil consiste à transférer de l'énergie à partir de la source à la charge, sans contact physique. Cette technologie peut être appliquée à la recharge de la batterie d'un véhicule électrique pour lequel cette opération quotidienne est obligatoire. Les aspects gênants due à la connexion d'un câble pénalisent certains utilisateurs et peuvent entraver le développement des véhicules électriques. Une solution conviviale consiste à utiliser un système de transmission de puissance sans contact. Cette solution offre une facilité et une bonne robustesse au niveau d'utilisation.

La première partie de ce chapitre sera consacrée à la recharge inductive. Les différents types de recharge inductive existants ainsi que leurs caractéristiques seront abordés. Aussi nous nous intéresserons dans cette partie à quelques projets de recharge inductive développés à travers le monde. Les projets que nous allons présenter portent essentiellement sur la recharge inductive dans le domaine des transports de façon générale et dans le domaine automobile en particulier. Nous présenterons donc des éléments de la norme régissant le domaine automobile.

Nous avons consacré la deuxième partie du chapitre aux voitures hybrides, en discutant de leurs divers types, des distinctions entre eux, ainsi que des perspectives de l'industrie automobile hybride.

#### II.2. Recharge par induction pour les véhicules électriques

La technologie de recharge sans contact pour véhicules électriques, également connue sous nom de recharge par induction, offre une méthode pratique et sans fil pour alimenter les batteries des véhicules électriques. Cela se fait à partir d'une voie spécialement équipée ou sont disposées des bobines qui ne s'activent que lors du passage du véhicule électrique. Nous parlerons alors de « route électrique ».

De ce fait, cette technologie novatrice élimine la nécessité de brancher physiquement un câble pour recharger, simplifiant ainsi le processus de recharge, mais pas uniquement cette solution futuriste pourrait offrir la possibilité de réduire la capacité des batteries embarquées dans le véhicule soit de réduire à la fois son poids et son prix [1].



Figure II.1. Recharge sans contact des véhicules électriques.

Comme mentionné précédemment, nous distinguons deux types de recharges inductives : la recharge statique et la recharge dynamique. Nous allons présenter dans ce qui suit ces deux modes de transfert d'énergie ainsi que plusieurs projets industriels dans le domaine des transports, mises en œuvre à travers le monde.

## II.3. Système de recharge sans contact

### II.3.1. Recharge statique

De nombreuses compagnies dans le monde ont développé leurs propres systèmes de recharge sans contact statiques. Nous citerons par exemple le Waseda Electric Bus au Japon avec une puissance allant de 30 kW à 150 kW pour une distance entre bobines émettrice et réceptrice de 105 mm (Figure II.2). Dans ce système, le véhicule se recharge à chaque passage dans les arrêts de bus. Citons également des projets de recharge de bus pour des puissances de respectivement 20 kW et 60 kW en Nouvelle Zélande et en Italie [2].

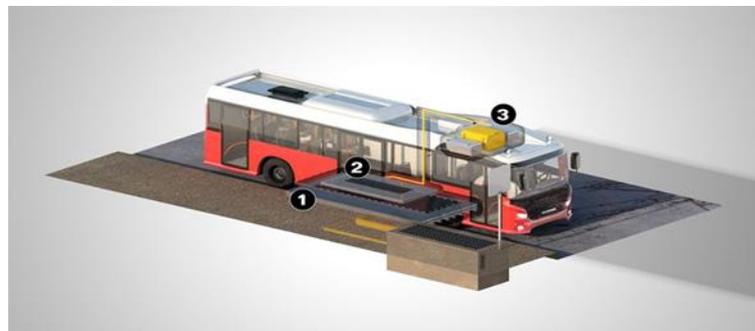


Figure II.2. Recharge du bus électrique par induction. Bobines situées sous la route et dans le plancher du bus et batteries sur le toit du véhicule.



a) Secondaire pendant le déplacement

b) Secondaire abaissé lors de la recharge.

Figure II.3. Secondaire du système Primove développé par Bombardier.

La société Bombardier propose également une solution de recharge aux arrêts pour le bus Primove à travers un système sans contact. La puissance de charge est de 200 kW [3]. La (Figure II.3) montre une partie du récepteur (sous le véhicule) qui s'abaisse pour se rapprocher de l'émetteur au sol.

En 2011 la société Qualcomm acquiert HaloIPT, propriété de l'université d'Auckland qui avait développé avec succès des systèmes de recharges inductifs sans contact pour Citroën et avait conclu un accord avec Rolls Royce pour la recharge de la voiture de luxe Phantom. Peu de temps après Qualcomm annonce la commercialisation de systèmes similaires pour le grand public.

En juillet 2012, WiTricity fait une démonstration avec une BMW électrique conduite du Massachusetts au Connecticut sur 225 km avec trois arrêts de rechargement sans fil. Sur le toit de la voiture trois lampes à LED permettent de visualiser le passage du courant électrique. Déjà, un concurrent arrive sur le marché. L'électricité sans fil connaît ainsi un démarrage prometteur.



Figure II.4. Système de transfert sans fil d'électricité adapté au transport par train.

Ainsi, le 13 février 2013, l'institut avancé de science et de technologie de la Corée (KAIST) et l'institut de recherche sur les chemins de fer de Corée ont-ils annoncé avoir développé un système de transfert sans fil d'électricité adapté au transport par train (Figure II.4). Plus fort encore que les systèmes

américains, la technologie coréenne permet le rechargement pendant les trajets, les arrêts et le parking. D'où une réduction d'un cinquième de la quantité des batteries nécessaires.

### II.3.2. Recharge dynamique

Cette recharge a fait l'objet de nombreuses études surtout dans le domaine des transports. Elle permettrait à terme qu'un véhicule se charge lors de son déplacement. La recharge se fait alors à partir de la route spécialement équipée de bobines émettrices qui ne s'activent que lors du passage du véhicule pour garantir la sécurité des usagers de la route et des passants. Nous parlerons alors de route électrique. Ce type de recharge présente l'avantage d'être transparent pour l'utilisateur en permettant une recharge et une utilisation simultanées du véhicule. Ce qui se traduit par une possible réduction de la taille des batteries, et donc du poids embarqué sur le véhicule, réduisant ainsi son coût d'acquisition, ainsi que le coût de gestion du recyclage des éléments de ces batteries.

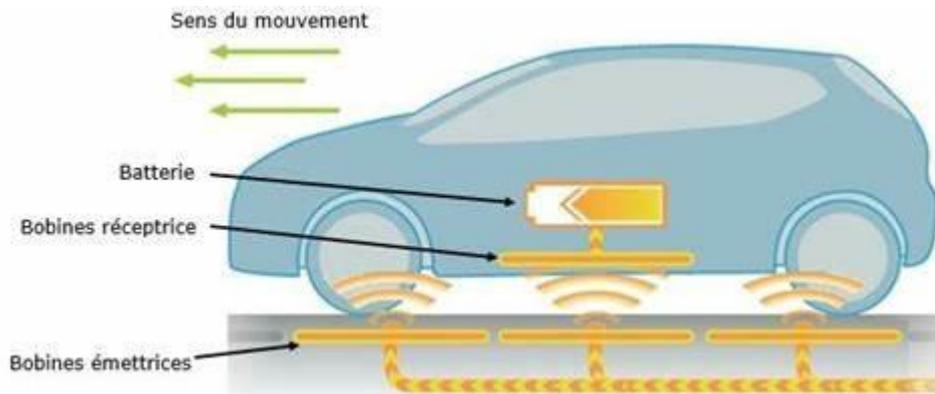


Figure II.5. Système de transfert sans fil d'électricité adapté aux voitures électriques.

Il est à noter qu'il existe deux familles pour la recharge inductive dynamique et ce, en fonction du type de route électrique (formes des bobines au sol). Les routes électriques peuvent en effet être équipées de pistes à émetteur segmenté ou de pistes à émetteur unique. La figure II.6 illustre ces deux types de pistes. Nous noterons aussi que le choix de l'utilisation d'un type de piste ou d'un autre doit prendre en considération différents aspects techniques et économiques.



Figure II.6. Différents types de pistes.

Pour les systèmes à émetteur unique, figure II.6 à gauche, le secondaire est de taille relativement petite par rapport au primaire. Ce type de piste présente l'avantage d'avoir un nombre de sources d'alimentation électrique des bobines primaire limité et il permet d'avoir un couplage relativement constant tout au long de la piste (quelle que soit la position du véhicule). Néanmoins, il présente un inconvénient sur la sûreté des utilisateurs et de l'environnement car la piste rayonne sur toute sa longueur pendant toute la durée du trajet de présence du véhicule d'un bout à l'autre de l'émetteur. Ce type de recharge est donc plus adapté aux voies réservées (bus tramway). En plus, et malgré un coefficient de couplage entre émetteur et récepteur constant, ce dernier est relativement faible réduisant de ce fait, le rendement énergétique du transfert.

Pour les pistes segmentées, il n'y a pas de différence de taille notable entre le primaire et le secondaire comme on peut le voir sur la figure II.6 à droite. Malgré l'inconvénient que présente ce type de piste de devoir connaître la position du véhicule en temps réel, il offre plus de sécurité aux usagers et aux personnes se trouvant à proximité de la piste, de par sa conception, seule la bobine faisant face au récepteur du véhicule est alimentée dans ce type de système.

L'utilisation de systèmes de recharge sans fil doit faire face à différents défis tels que le déplacement du véhicule ou son désalignement (ou désaxement) par rapport à la piste de la route électrique. Néanmoins, ce type de recharge séduit de plus en plus comme en attestent plusieurs programmes plus ou moins aboutis développés par différentes entreprises et universités. Nous citerons quelques exemples ci-dessous :

Le projet Californien RPEV pour Roadway Powered Electric Vehicle Project (Université de Berkeley) a abouti à la réalisation d'une portion de piste permettant l'alimentation d'un mini bus de 35 personnes avec une puissance de 200 kW, un courant d'alimentation de 2000 A à une fréquence variant entre 180 Hz et 400 Hz et un air gap de 7,5 cm [5].

Un autre projet, réalisé cette fois par l'école polytechnique fédérale de Lausanne, le projet Serpentine, est illustré sur la figure II.7. Le prototype était un véhicule capsule autonome. Le projet a démontré la faisabilité d'un système de recharge sans contact avec un rendement de l'ordre de 88% [6].



Figure II.7. Projet Serpentine EPFL.

L'entreprise Nissan s'est également intéressée à la recharge dynamique sans contact et, en novembre 2013, les membres de l'équipe de recherche ont réalisé un système à taille réelle. Dans ce système d'un kilowatt, plusieurs bobines d'une longueur de 1,6 m et d'une largeur de 0,3 m sont positionnées les unes après les autres pour former 10 m de piste d'essai [9].

En 2010, l'institut des sciences et technologies de Corée (KAIST) a conçu un bus alimenté sans contact avec un rendement de 85 % pour une puissance de 100 kW, le tout à une fréquence de 20 kHz. En plus, de plusieurs segments de pistes, les terminus, quelques arrêts et des aires de stationnement sont équipés pour recharger le bus à l'arrêt avec toujours un air gap de 20 cm [3] [10] [11].

Le constructeur français Renault a développé pour sa part un système de recharge inductif de 2,5 kW avec 15 cm d'air gap, la tension du bus continu est de 60 V le tout fonctionnant à 85 kHz. Le projet a été réalisé en collaboration avec Supélec. La figure II.8 montre une photo de ce système [12].



Figure II.8. Système développé par Renault-Supélec.

Le projet FABRIC est un projet européen qui a pour but d'étudier et d'analyser des technologies de recharge inductive de véhicules électriques. Ce projet se déroule sur 3 sites en Europe (France, Suède et Italie) [13] [14]. La figure II.9 montre le site d'essai du projet FABRIC en Italie. On peut voir sur cette photo aérienne une piste d'essai spécialement conçue pour tester la technologie en milieu urbain. Plusieurs études ont été menées sur ce site. Citons par exemple des études concernant la détection de véhicules, ou encore l'alimentation de plusieurs véhicules en même temps sur la même piste.



Figure II.9. Piste FABRIC en Italie.

La multiplication des initiatives et des projets de véhicule à recharge inductive a poussé les différents acteurs du domaine à standardiser ce type de recharge. C'est ainsi qu'est né la norme J2954 qui est toujours en cours de préparation par la « SAE international » anciennement appelée « Society of Automotive Engineers ». Cette organisation internationale d'informations et d'idées pour tout ce qui touche à l'ingénierie des véhicules.

Cette norme classe aussi les systèmes de charge par induction en fonction de leur puissance nominale (Tableau II.1). Ainsi, quatre gammes de puissances ont été définies dans le standard [14].

Tableau II.1. Gammes de puissance définies par la norme SAE J2954.

	WPT1	WPT2	WPT3	WPT4
Puissance maximale en entrée (KVA)	3,7	7,7	11,1	22
Rendement minimum	> 85%	> 85%	> 85%	A définir
Rendement cible minimum à la position décalée	> 80%	> 80%	> 80%	A définir

Le standard définit aussi une classification par rapport à la distance entre le primaire et le secondaire (air gap) [14]. Cette classification est appelée Z class. Le tableau II.2 illustre les différentes classifications partant de 100 mm jusqu'à 250 mm.

Tableau II.2. Classes de séparation définies par la norme SAE J2954.

Classe	Distance (bobines véhicule – sol) [mm]
<b>Z1</b>	<b>100-150</b>
<b>Z2</b>	<b>140-210</b>
<b>Z3</b>	<b>170-250</b>

## II.4. Recharge Hybride

### II.4.1. Définition de voiture hybride

Une voiture hybride est un véhicule équipé à la fois d'un moteur à combustion interne (généralement à essence) et d'un moteur électrique. Ces deux sources d'énergie travaillent ensemble pour optimiser la consommation de carburant et réduire les émissions polluantes. Le moteur électrique est utilisé pour les faibles vitesses et les économies de carburant, tandis que le moteur à essence intervient lors des déplacements plus rapides.

### II.4.2. Versions de voitures hybrides

On distingue trois versions d'hybrides ou modèles existents : les hybrides non rechargeables ou « full hybrid », les hybrides rechargeables ou « plug-in hybrid » et les hybrides doux « mild hybrid ».

#### II.4.2.1. Véhicule électrique non rechargeable « full hybrid »

La voiture hybride non rechargeable ou « full hybrid » est équipée à la fois d'un moteur thermique, d'un ou plusieurs moteurs électriques, et d'une batterie dont la capacité est inférieure à 2 kWh [16].

Dans une voiture full hybrid, le moteur électrique sert d'assistant au moteur thermique avec l'énergie cinétique créée lors des phases de décélération et de freinage, il fait office de générateur qui permet le rechargement de la batterie.



Figure II.10. Nouvelle Renault CLIO E-TECH Hybrid « full hybrid ».

En fonction des technologies, le véhicule peut proposer jusqu'à 80% de conduite en tout électrique en ville. Mais sa batterie n'intègre pas de dispositif de rechargement sur borne [16].

La voiture hybride « full hybrid » a néanmoins une autonomie plus grande qu'un véhicule classique car elle alterne trois modes de traction : un fonctionnement en mode thermique, en mode hybride et en

mode électrique. Elle permet aussi de faire des économies jusqu'à -40% sur le carburant en conduite urbaine [16].

#### II.4.2.2. Véhicule électrique rechargeable (mix entre full hybride et électrique)

Tous comme la « full hybride », la voiture hybride rechargeable fonctionne à l'aide de deux types de moteur : un moteur thermique et un ou plusieurs moteurs électriques.

Les voitures hybrides rechargeables possèdent une batterie plus grande ce qui leur permet de rouler sur une plus longue distance en mode tout électrique. Pour cette raison, leur recharge est plus flexible : Les hybrides rechargeables peuvent être rechargés à domicile ou sur les bornes de recharge publiques.

L'utilisation d'une prise de charge externe permet de recharger la batterie électrique pour une utilisation en tout électrique sur des distances plus longues. Le temps de recharge varie en fonction de la puissance du chargeur utilisé et de la capacité de la batterie [18].

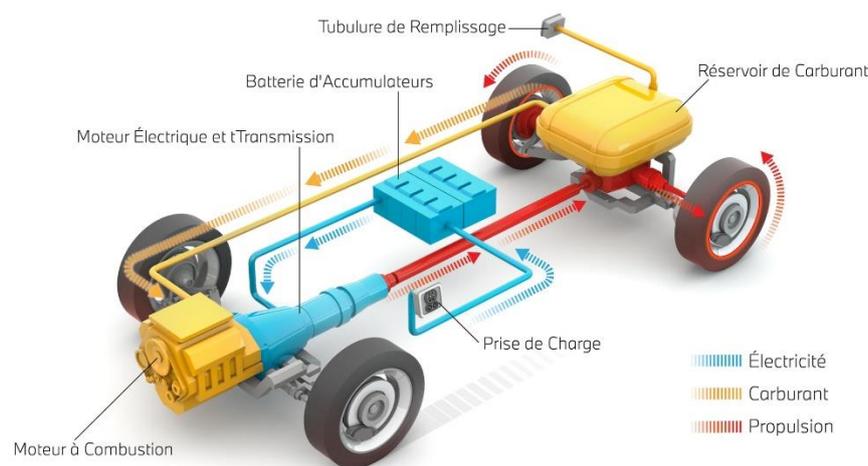


Figure II.11. Voiture hybride rechargeable.

#### II.4.2.3. Véhicule hybride doux « Mild hybrid »

Les véhicules hybrides doux (Mild Hybrid) sont équipés d'un petit moteur électrique qui assiste le moteur à combustion interne, mais ne permet pas une conduite en tout électrique. Leur objectif principal est d'améliorer l'efficacité énergétique en réduisant la consommation de carburant et les émissions de CO<sub>2</sub>. Les voitures hybrides douces intègrent un petit moteur électrique associé à un moteur à combustion interne. Ce système permet au moteur électrique de soutenir le moteur à essence, en offrant une assistance supplémentaire lors de l'accélération et de la décélération, tout en récupérant l'énergie cinétique lors du freinage.

Cette récupération d'énergie permet d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Vous n'aurez donc pas besoin de la recharger par le biais d'une prise électrique. Les hybrides douces sont donc une solution abordable et progressive vers l'électrification [18].

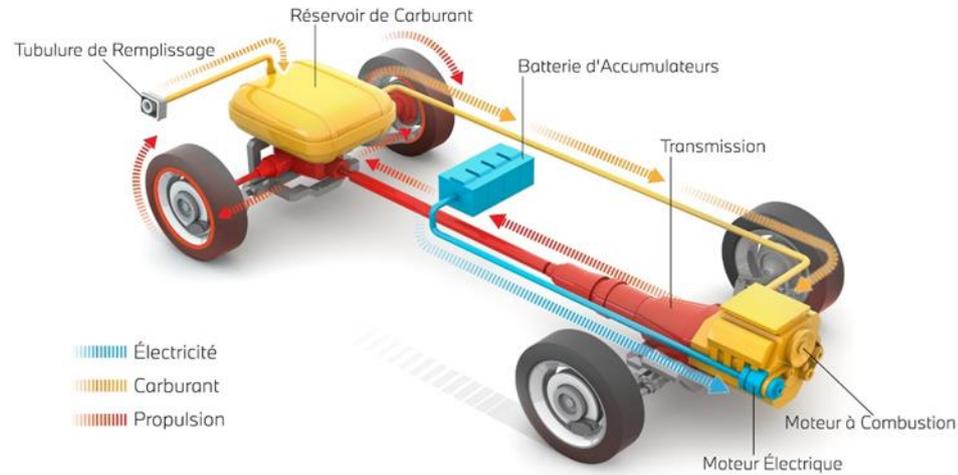


Figure II.12. Voiture électrique « Mild hybrid ».

## II.5. Conclusion

Ce chapitre a exploré en profondeur les différents aspects de la recharge inductive, révélant ainsi une palette étendue de projets innovants provenant d'industriels et de laboratoires de recherche à l'échelle mondiale. En examinant les technologies variées de recharge sans fil pour véhicules électriques, nous avons mis en lumière leur potentiel de transformation pour l'avenir de la mobilité durable. Des collaborations stratégiques entre constructeurs automobiles et fournisseurs de technologies ont été examinées, tout comme les initiatives ambitieuses de recherche universitaire visant à améliorer l'efficacité et la portée des systèmes de recharge inductive.

## Références

- [1] Maëlle , Laurent, «La recharge rapide par induction pour voitures électriques : a-t-elle de l'avenir ?», 23 Novembre 2023.
- [2] É. LABOURÉ, «Recharge sans contact de véhicules électriques,» *Publication 3EI N° 3EI* , p. 100, 2020.
- [3] C. M. Chun T. Rim, *Wireless Power Transfer for Electric Vehicles and Mobile Devices*, L. first edition John Wiley & Sons, Éd., 2017.
- [4] [En ligne]. Available: [https://olev.kaist.ac.kr/20120323/sub02/KAIST\\_OLEV\\_en.pdf](https://olev.kaist.ac.kr/20120323/sub02/KAIST_OLEV_en.pdf).
- [5] university of california. Berkeley, 1994. Institute of transportation studies.
- [6] [En ligne]. Available: Available : [http://www.serpentine.ch/p\\_realisations/Realisations.html](http://www.serpentine.ch/p_realisations/Realisations.html). [Accessed: 01-Jan-2018].
- [7] A. H. Y. N. a. K. T. K. Throngnumchai, «Design and evaluation of a wireless power transfer system with road embedded transmitter coils for dynamic charging of electric vehicles,» chez *World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, novembre 2013.
- [8] C. B. Auvigne, École polytechnique fédérale de Lausanne.
- [9] «"The Serpentine Peoplemover System" [Online],» [En ligne]. Available: Available : <https://faculty.washington.edu/jbs/itrans/serpen.htm>. . [Accès le Last modified: January 21, 2002].
- [10] «"smfir",» [En ligne]. Available: [http://www.smfir.co.kr/20120323/sub02/KAIST\\_OLEV\\_en.pdf](http://www.smfir.co.kr/20120323/sub02/KAIST_OLEV_en.pdf). [Accès le [Accessed: 01-Jan2018].].
- [11] S. e. J.Kim, «"Magnetic field design for high efficient and low EMF wireless power transfer in on-line electric vehicle,"» chez *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Roma-italie, 2011.
- [12] A. Caillierez, *Etude et mise en oeuvre du transfert de l'énergie électrique par induction : application à la route électrique pour véhicules en mouvement*, université de Paris saclay, januray 2011.
- [13] «"Fabric project",» [En ligne]. Available: <https://www.fabric-project.eu>. [Accès le 01 janvier 2018].
- [14] A.Hammoud, «*Charge par induction de véhicules électriques : Analyse du potentiel, limitations, nouveaux concepts*, », université de montpellier, 2017.

- [15] D. Patil, M. K. McDonough, J. M. Miller, B. Fahimi et P. T. Balsara, «Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges,» 06 December 2017.
- [16] Helder Macas, «Comment se recharge une voiture hybride ?,» 06 janvier 2023. [En ligne]. Available: <https://blog.renault.re/comment-se-recharge-une-voiture-hybride>.
- [17] Didier Ric, «Renault Clio 5 vs Toyota Yaris 4 : le match de l'hybride !,» 04 mars 2020. [En ligne]. Available: <https://www.largus.fr/actualite-automobile/renault-clio-5-vs-toyota-yaris-4-le-match-de-lhybride-10211398.html>.
- [18] «Voitures Hybrides : comment les recharger ?,» 07 Septembre 2023. [En ligne]. Available: <https://www.auto-ici.fr/blog/voitures-hybrides-comment-recharger>.
- [19] «hybride rechargeable et autres voitures électriques,» 29 JUIN 2022. [En ligne]. Available: <https://www.bmw.com/fr/innovation/hybride-rechargeable-et-autres-voitures-electriques.html>.

# *Chapitre III*

## **Modélisation des systèmes de transfert d'énergie sans fil**

## Chapitre III

# Modélisation des systèmes de Transfert d'énergie sans fil

### III.1. Introduction

La technologie de transfert d'énergie sans fil ou par induction, repose sur un concept simple mais profond, à savoir qu'un champ magnétique change dans une bobine induit un courant électrique dans une bobine voisine. Dans le domaine de la recharge sans fil des véhicules électriques, la première bobine, souvent appelée émetteur, est généralement enfouie dans le sol ou dans un socle de recharge. La seconde bobine, appelée récepteur, est située souvent au-dessous du châssé du véhicule.

Dans ce chapitre, nous allons donner un aperçu du transfert d'énergie sans fil par un lien inductif. Au début, nous allons présenter le principe de fonctionnement d'un lien inductif et nous allons faire un petit rappel sur les méthodes de résolution pour définir les paramètres de lien inductif. Ensuite, et après avoir choisi la méthode appropriée pour notre travail, on va étudier le lien inductif entre deux spires par la méthode choisie.

### III.2. Principe de fonctionnement d'un lien inductif

Le comportement d'un lien inductif comprenant un circuit primaire (système d'émission) et un circuit secondaire (système de réception) peut être traité à deux niveaux d'abstraction différents, une description des champs électromagnétiques et une description du système. Ces deux abstractions sont complémentaires, cependant il peut être difficile de faire le passage de l'une à l'autre. La description électromagnétique est basée sur la géométrie et la composition physique des éléments de liaison, mais elle ne donne pas l'information directe sur la façon dont les signaux électriques se propagent dans le lien de transfert d'énergie. Aussi, une description au niveau circuit peut être utilisée pour déduire les caractéristiques du lien, mais les paramètres clés, c'est-à-dire les éléments composant le circuit comme les inductances, les éléments parasites, la mutuelle et le coefficient de couplage, peuvent seulement être extraits de la description des champs électromagnétiques. Cette extraction de paramètres n'est pas toujours une tâche facile due à la complexité des équations découlant de la géométrie du dispositif [1]. Pour ce faire, deux méthodes les plus courantes existent, les méthodes numériques et les méthodes analytiques. Ci-dessous, nous ferons un petit rappel sur ces méthodes et par conséquent, nous choisirons la méthode appropriée pour résoudre notre problème.

### III.3. Méthodes de résolution

La résolution des formulations électromagnétiques revient à résoudre des équations aux dérivées partielles (EDP). Cette résolution joue un rôle très important pour la modélisation des dispositifs électromagnétique.

Il existe plusieurs méthodes pour la résolution des EDP, ces méthodes sont analytiques, numériques ou mixtes (semi-analytiques) [2].

### **III.3.1. Méthodes analytiques**

#### ***III.3.1.1. Méthode de séparation des variables***

C'est la méthode la plus utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles, le principe de cette méthode consiste à mettre l'inconnue sous forme d'un produit des fonctions, dont chacune ne dépend que d'une seule variable [2].

### **III.3.2. Méthodes semi-analytiques**

#### ***III.3.2.1. Méthodes des intégrales des frontières***

Cette méthode est basée sur la discrétisation des frontières du domaine, en utilisant pour cela le théorème de GREEN, Elle est limitée à la résolution des systèmes linéaire [2].

#### ***III.3.2.2. Méthode des circuits couplés***

La méthode des circuits couplés permet de fournir la solution d'une EDP par une expression intégrale de type Biot et Savart, et elle est peut être couplée à une méthode numérique de discrétisation.

### **III.3.3. Méthodes numériques**

La plupart du temps, où les solutions des équations de Maxwell sont difficiles ou impossibles, il faut utiliser les méthodes numériques. Ces dernières, permettent d'obtenir une solution proche de la solution exacte du problème étudié. Ci-dessous, nous allons présenter les méthodes numériques les plus utilisées [2].

#### ***III.3.3.1. Méthode des différences finies***

La méthode des différences finies est l'une des techniques de résolution approchée d'équations aux dérivées partielles qui consiste à résoudre un système de relations (schéma numérique) liant les valeurs des fonctions inconnues en certains points suffisamment proches les uns des autres. En apparence, cette méthode est en général simple à mettre en œuvre, elle procède en la discrétisation du domaine d'étude (l'espace discrétisé ou maillage) et des opérateurs de dérivation/différentiation. Une discrétisation des opérateurs différentiels (dérivées premières, secondes, etc., dérivées partielles) peut

être obtenue par les formules de Taylor, en particulier celle de Taylor avec reste intégral permet de mesurer les erreurs.

### III.3.3.2. Méthode des volumes finis

En analyse numérique, la méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles, comme la méthode des différences finies et celle des éléments finis. Contrairement à la méthode des différences finies qui met en jeu des approximations des dérivées, les méthodes des volumes finis et des éléments finis exploitent des approximations d'intégrales. Toutefois, la méthode des volumes finis se base directement sur la forme dite forte de l'équation à résoudre, alors que la méthode des éléments finis se fonde sur une formulation variationnelle de l'équation (on parle aussi de formulation faible).

### III.3.3.3. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) est basée sur la transformation des équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. Elle s'adapte très bien aux milieux hétérogènes et aux domaines de formes complexes.

## III.4. Modèle électromagnétique

Dans cette partie, nous allons présenter la méthode analytique que nous avons reproduire et qui permet de déterminer la self-inductance d'une bobine de forme plate et également la mutuelle inductance entre deux bobines couplées formant un lien inductif et placées arbitrairement dans l'espace. Pour ce faire, nous allons commencer par étudier le cas de deux spires élémentaires [3].

### III.4.1. Lien inductif entre deux spires

On considère deux spires situées arbitrairement dans l'espace (désalignements axial et angulaire) et couplées entre eux. On note la première spire  $l_p$  qui a un rayon  $R_p$  et un centre  $O(0,0,0)$ . Et la deuxième spire  $l_s$  qui a un rayon  $R_s$  et un centre  $c(x_c, y_c, z_c=d)$ , Comme le montre l'image ci-dessous :

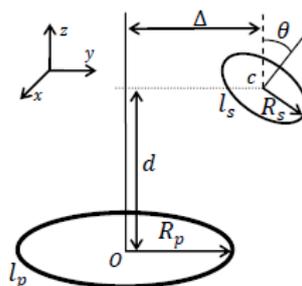


Figure III.1. Lien inductif entre deux spires placées arbitrairement dans l'espace (désalignement angulaire et axial).

Chaque spire peut être modélisée par une inductance  $L$  en série avec une résistance  $R$ , le tout en parallèle avec une capacité  $C$ . En effet, la résistance  $R$  représente la résistance interne de l'inductance, tandis que la capacité  $C$  correspond à la capacité parasite. De manière générale, les paramètres électriques d'une spire varient en fonction de la fréquence.

Ainsi, le modèle électrique équivalent à deux spires couplées est illustré par la figure III.2. Les inductances propres des spires  $l_p$  et  $l_s$  sont respectivement notées  $L_p$  et  $L_s$ . Les résistances internes et les capacités parasites de chaque spire sont notées  $R_p$ ,  $R_s$ ,  $C_p$  et  $C_s$ .  $M$  représente l'inductance mutuelle entre les deux spires couplées [4].

Dans la suite nous détaillons le principe de calcul analytique qui permet de déterminer les valeurs de l'inductance propre  $L$  et la mutuelle inductance  $M$  entre deux spires couplées et situées arbitrairement dans l'espace.

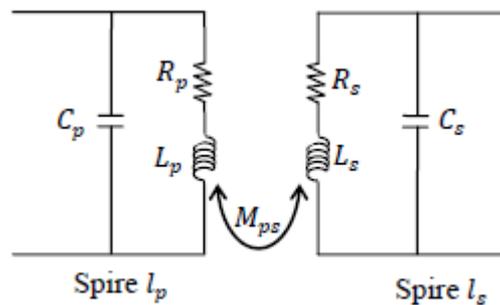


Figure III.2. Modèle électrique équivalent à deux spires couplées.

L'inductance propre d'une spire de rayon  $R$  et de section  $a$  est donnée par :

$$L(a, R) = \mu_0 \left( \ln \left( \frac{8a}{R} \right) - 2 \right) \quad (\text{III.1})$$

L'inductance mutuelle entre le circuit externe et interne est définie par l'expression (III.2) :

$$M_{12} = K_{12} \sqrt{L_1 L_2} \quad (\text{III.2})$$

Le coefficient de couplage  $k$  indique la proportion du champ magnétique de la bobine primaire  $L_1$  capturé par la bobine secondaire  $L_2$  et il dépend de la géométrie des bobines (forme, taille), de la position relative (distance et angle entre les bobines) et des propriétés du matériau.

Physiquement,  $k$  est égal à la fraction du flux magnétique généré par la bobine externe  $L_1$ , qui traverse la bobine interne  $L_2$ ; le coefficient de couplage  $k$  est compris entre 0 et 1 et est calculé à partir de l'expression (III.3) :

$$k_{12} = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$M_{12}$  : la mutuelle inductance.

$L_1, L_2$  : les inductances propres de chaque bobine.

Le coefficient de couplage  $k$  égal à 1, le couplage est maximal entre les bobines et pour que le coefficient de couplage  $k$  soit égal à 0, le couplage est minimal entre les bobines.

Le coefficient  $k$  est le principal facteur utilisé pour déterminer la quantité d'énergie pouvant être livrée à la bobine secondaire.

Dans un excellent article, S. Babic et all ont développé une méthode analytique qui permet de calculer la mutuelle inductance entre deux spires couplées et situées arbitrairement dans l'espace (en présence de désalignements axial et latéral). Nous avons utilisé ces résultats pour déterminer la self-inductance  $L$ , la mutuelle inductance  $M$  et le coefficient de couplage  $k$ .

La nouvelle formule de la mutuelle inductance entre deux spires situées arbitrairement dans l'espace est donnée par :

$$M(R_p, R_s, \Delta, d, \theta) = \frac{\mu_0 R_s}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{[P_1 \cos\varphi + P_2 \sin\varphi + P_3] \Psi(q)}{q \sqrt{V_0^3}} d\varphi \quad (\text{III.4})$$

Avec  $R_p$  le rayon de la première spire,  $R_s$  le rayon de la deuxième spire.  $\Delta$  et  $d$  correspondent aux désalignement axial et latéral, et  $\theta$  au désalignement angulaire. Les autres paramètres sont définis par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{R_s}{R_p}, \quad \beta = \frac{x_c}{R_p}, \quad \gamma = \frac{y_c}{R_p}, \quad \delta = \frac{z_c}{R_p}, \\ l &= \sqrt{a^2 + c^2}, \quad L = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}, \\ P_1 &= \pm \frac{y_c}{l}, \quad P_2 = \mp \frac{\beta l^2 + yab}{lL}, \quad P_3 = \frac{ac}{L}, \quad P_4 = \mp \frac{\beta ab - \gamma l^2 + \delta bc}{lL}, \quad P_5 = \mp \frac{\beta c - \delta a}{l}, \\ A_0 &= 1 + \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 + \delta^2 + 2\alpha(P_4 \cos\varphi + P_5 \sin\varphi), \\ V_0^2 &= \alpha^2 \left[ \left(1 - \frac{b^2 c^2}{l^2 L^2}\right) \cos^2\varphi + \frac{c^2}{l^2} \sin^2\varphi + \frac{abc}{l^2 L} \sin 2\varphi \right] + \beta^2 + \gamma^2 \mp 2\alpha \frac{\beta ab - \gamma l^2}{lL} \cos\varphi \mp \frac{2\alpha\beta c}{l} \sin\varphi, \\ q &= \sqrt{\frac{4V_0}{A_0 + 2V_0}}, \quad \Psi(q) = \left(1 - \frac{q^2}{2}\right) K(q) - E(q), \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

Où  $K(q)$ ,  $E(q)$  sont des fonctions de Bessel de premier et deuxième ordre. Et ils sont les suivants :

$$K(\rho, q) = \int_0^\rho \frac{1}{\sqrt{1 - q^2 \sin^2\theta}} d\theta, \quad (\text{III.6})$$

$$E(\rho, q) = \int_0^\rho \sqrt{1 - q^2 \sin^2\theta} d\theta, \quad \text{avec } \rho = \pi/2. \quad (\text{III.7})$$

Dans la suite, nous étudions les valeurs du coefficient de couplage  $k$ , pour trois valeurs différentes de la distance inter-bobine  $d$  normalisée par rapport à  $R_p$  (rayon de la spire primaire  $l_p$ ) : 0,1, 0,4 et 1. Nous avons obtenu les résultats présentés dans les figures ci-dessous :

Les figures suivantes illustrent l'étendue de l'effet de désalignement angulaire et latéral sur le facteur de couplage  $k$ . On remarque que la plupart des cas, le coefficient de couplage est toujours maximal pour la même valeur qui égale 0.

### ❖ L'influence de désalignement latéral

En premier lieu, nous avons étudié la variation du coefficient de couplage  $k$  en fonction de désalignement latéral de l'intervalle  $-2 \leq \Delta/R_p \leq +2$ , pour un rapport de  $R_s/R_p=0.5$  et pas de désalignement angulaire donc  $\theta=0$ . Comme indiqué dans la figure III.3.

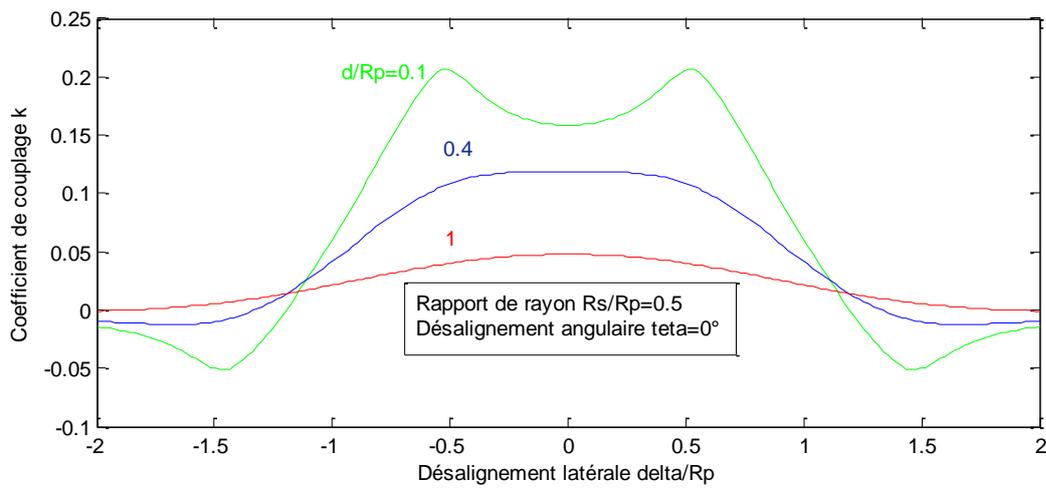


Figure III.3. Coefficient de couplage en fonction du désalignement latéral.

Nous avons fait la même chose que précédemment, mais avec un désalignement angulaire qui estimé à  $\theta=10^\circ$ . Et nous avons obtenu la figure suivante :

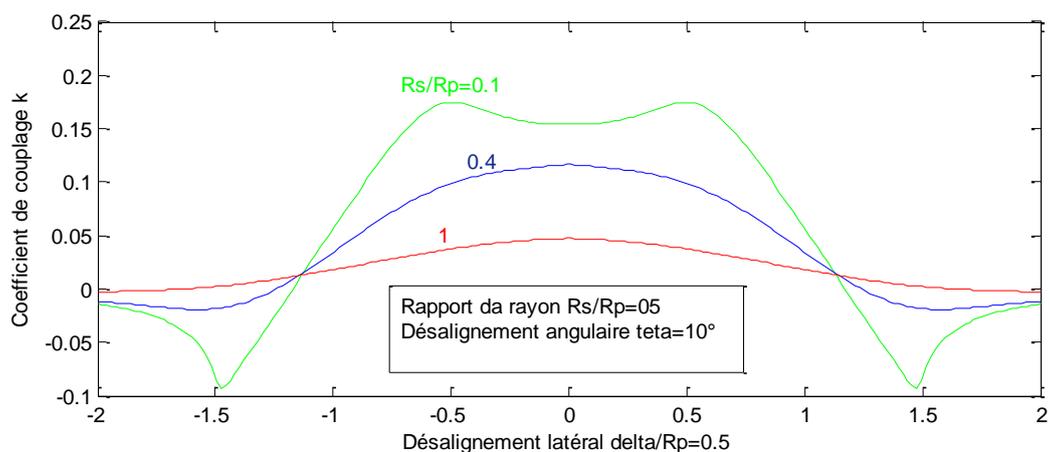


Figure III.4. Coefficient de couplage en fonction du désalignement latéral et angulaire.

Les figures III.3 et III.4 montrent également l'influence du désalignement latéral sur le coefficient de couplage. Nous avons observés que le coefficient de couplage prend leur valeur maximale plus que le désalignement diminue. Cela signifie que la quantité de l'énergie transmise augmente avec la

rapproche de la spire secondaire par rapport au primaire jusqu'à avoir un système où les spires sont placées dans une configuration concentrique et coplanaire.

### ❖ L'influence de désalignement angulaire

Ensuite, nous avons calculé les valeurs de coefficient de couplage  $k$  en fonction de  $\theta$  (la présence de désalignement angulaire), pour un rapport de  $R_s/R_p=0.5$  et  $\Delta/R_p=0$  (pas de désalignement latéral). La figure ci-dessous l'illustre :

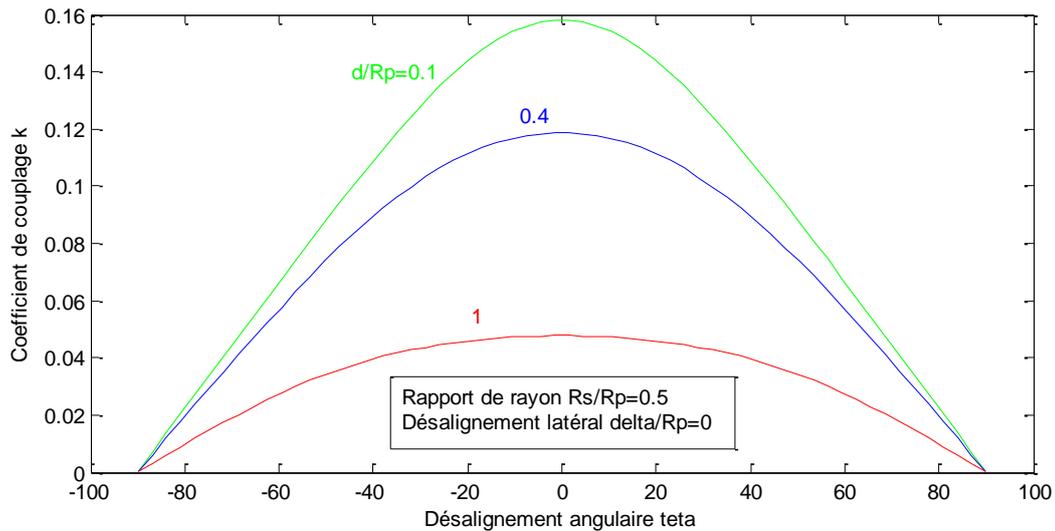


Figure III.5. Coefficient de couplage en fonction du désalignement angulaire.

La figure III.6 est la même que celle que nous avons réalisée dans la figure précédente, mais avec un désalignement latéral de  $\Delta/R_p=0.5$ .

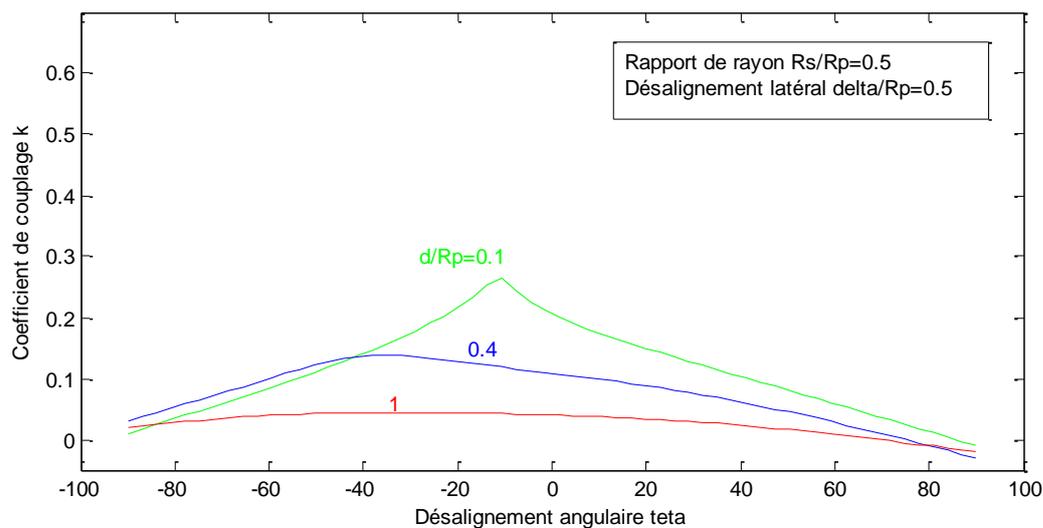


Figure III.6. Coefficient de couplage en fonction du désalignement angulaire et latéral.

D'après ces figures, on peut remarquer que plus le désalignement angulaire est devenu important plus le coefficient de couplage prend des valeurs plus faibles.

Dans la figure III.5 où il existe juste le désalignement angulaire nous pouvons remarquer que la plage de variation de coefficient de couplage est plus large par rapport au cas dans la figure III.6 ; qui la diminution de coefficient de couplage est plus rapide en synchronisation avec l'augmentation du désalignement angulaire.

Donc, nous pouvons conclure que le désalignement angulaire et latéral ensemble influencent considérablement sur le coefficient de couplage, contrairement à leur effet individuel qui est minime.

Nous pouvons ajouter une petite remarque selon laquelle à  $\theta=90^\circ$  (les bobines émettrice et réceptrice sont perpendiculaires), le transfert d'énergie est nul.

### **III.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté tout d'abord un système de transfert d'énergie sans fil par un lien inductif entre deux spires appropriées aux véhicules électriques.

Au début, une généralité sur les différentes approches de modélisation électromagnétique a été présentée et sa caractéristique. Ensuite, nous avons présenté une modélisation des paramètres électriques d'un lien inductif. Pour ce faire, nous avons reproduire un modèle analytique permettant d'évaluer avec précision les paramètres électriques.

D'après ce qu'on a présenté, on conclut que le modèle analytique est approprié pour notre travail afin d'étudier le lien inductif. Ce modèle, basé sur l'utilisation d'hypothèses simplificatrices, est le plus rapide et capable de fournir des informations/résultats sur les grandeurs globales avec un niveau de précision très acceptable.

L'efficacité maximale de transfert d'énergie dans le lien inductif est obtenue pour un coefficient de couplage maximal et l'absence totale de désalignement latéral ou angulaire.

## Références

- [1] A. LAKHDARI, «Principe de fonctionnement d'un lien inductif,» *Développement d'un système de transfert d'énergie sans fil :application au domaine biomédical*, pp. 31-32, 2020.
- [2] C. GAOUIR et R. REZKOUNE, *Modèles neuronaux pour le CND à flux de fuite magnétique*, pp. 24-26, 2019.
- [3] B. BOUCHEBBAH et N. BENNICHE, «Modèle électromagnétique,» *Étude et modélisation du Transfert Sans fil d'Énergie Électrique en Continu.*, p. 35, 208.
- [4] B. Laroussi, C. François, O. Chaker et L. Jean-Christophe, «Transmission d'énergie par couplage inductif. Applications aux capteurs biomédicaux intégrés,» 2014.
- [5] «Qualité et assurance qualité en chimie analytique,» [En ligne]. Available: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-qualite-et-securite-au-laboratoire-tiasl/archive-1/qualite-et-assurance-qualite-en-chimie-analytique-p280/la-methode-analytique-p280niv10003.html> .
- [6] A. TATAR et B. KACI, «Méthodes numériques,» *Recharge sans contact des véhicules électriques*, p. 33, 01 07 2023.

# *Chapitre IV*

*Outil de gestion d'énergie dans un système  
de recharge sans contact*

## Chapitre IV

### Outil de gestion d'énergie dans un système de recharge sans contact

#### IV.1. Introduction

La recharge sans contact des batteries présente divers avantages pour les véhicules électriques. Cette méthode est simple à utiliser, robuste et résiste mieux aux conditions météorologiques que les câbles traditionnels. Elle repose sur le principe du couplage magnétique entre un émetteur et un récepteur, cette technologie permet de transférer plusieurs dizaines de kilowatts sur des courtes distances (quelques dizaines de centimètres).

L'objectif de ce chapitre est de proposer, développer et mettre en œuvre un outil visant à permettre la recharge des voitures électriques dans les parkings dotés de la technologie de recharge sans contact, tout en assurant une gestion d'énergie optimale et une sécurité maximale des êtres humains ainsi que des appareils électriques.

#### IV.2. Problématique

Le domaine des véhicules électriques est en très forte croissance mais doit faire face à de nombreux enjeux, au premier rang desquels la complexité de la conception des systèmes de transfert d'énergie sans fil. D'une part, il est essentiel d'assurer une gestion d'énergie optimale afin d'optimiser l'efficacité de la transmission d'énergie. Cela implique de minimiser les pertes d'énergie lors du transfert pour que l'électricité puisse être utilisée de manière efficace par le dispositif récepteur, qu'il s'agisse d'une voiture électrique dans notre travail.

D'autre part, il est tout aussi important de prendre en compte les aspects de sécurité liés au rayonnement électromagnétique. Un niveau de rayonnement élevé à proximité du dispositif de transfert d'énergie peut être préoccupant, car il peut potentiellement affecter la santé des personnes et la sécurité des appareils électriques situés à proximité. Des études ont montré que l'exposition prolongée à certains types de rayonnement électromagnétique peut avoir des effets néfastes sur la santé, notamment des risques de cancer ou des troubles neurologiques, ainsi que des perturbations de fonctionnement sur les différents appareils électriques disponibles dans les parkings.

#### IV.3. Explication générale du travail

L'objectif principal de notre travail est de proposer, développer et mettre en œuvre un outil innovant qui facilite la recharge des voitures électriques dans les parkings dédiés, tout en garantissant à la fois une

gestion d'énergie optimale et une sécurité maximale des êtres humains ainsi que des appareils électriques.

Nous allons réaliser un prototype d'un système de recharge sans contact et intelligent du point de vue gestion d'énergie optimale, basé sur deux capteurs de présence d'objet (capteurs ultrasoniques) qui sont placés d'une manière stratégique pour détecter la présence d'une voiture électrique. Lorsqu'une voiture s'approche au endroit de stationnement, les capteurs détectent sa présence à partir des mesures de distance et envoient des informations au microcontrôleur (Carte Arduino Uno) qui est le cerveau du système, il contrôle les capteurs et prend des décisions basées sur les données qu'il collecte.

Le microcontrôleur traite le signal viens des capteurs et, si la voiture est correctement positionnée, un relais électrique active le circuit de recharge, une fois le relais est activé le circuit deviens fermer et la recharge sans fil commence. Le relais joue ici le rôle d'un interrupteur contrôlé pour assurer que la recharge ne commence que lorsque toutes les conditions sont remplies.

Lorsque le capteur détecte le déplacement de la voiture après une recharge des batteries pleine ou partielle, il envoie un signal au microcontrôleur. Ce dernier désactive alors le relais, arrêtant ainsi le processus de recharge.

Pour afficher l'état de la voiture (si elle est en position de recharge), un afficheur LCD peut être utilisé de manière efficace, cet écran doit être compatible avec notre système (Arduino, capteurs, relais,...etc) avec un nombre suffisant de lignes et de colonnes pour afficher les informations nécessaires.

## **IV.4. Matériels utilisés**

### **IV.4.1. Carte Arduino Uno**

#### **IV.4.1.1. Définition de la carte Arduino Uno**

Une carte Arduino est une carte électronique équipée d'un microcontrôleur. Ce dernier permet de programmer et de commander des actions, à partir des situations qui sont détectées par des capteurs. La carte Arduino est donc une interface programmable [1].

Il existe différentes cartes Arduino, comme la Mega, la mini, nano, due, leonardo etc, dont le choix se fera en fonction du besoin au niveau du projet, chacune ayant ses spécificités.

L'utilisation de la carte Arduino dans notre travail comme base pour une carte d'acquisition est une option populaire en raison de sa facilité d'utilisation, de sa polyvalence et de sa large communauté de développeurs. Bien que l'Arduino Uno ne soit pas initialement conçu comme une carte d'acquisition

professionnelle haut de gamme, il peut être adapté à de nombreuses applications d'acquisition de données à petite échelle.



Figure IV. 1. Carte Arduino Uno.



Figure IV. 2. Présentation d'Arduino.

#### IV.4.1.2. Composition de la carte Arduino Uno

Arduino Uno est une carte animée par un microcontrôleur ATmega 328P-PU, qui intègre un processeur cadencé à 16 MHz, 2 ko de SRAM et 32 ko de ROM. Autour de lui, on trouvera un connecteur d'alimentation en courant continu, nécessitant 7 à 12V, un port USB type B, un bouton reset, une LED, des entrées-sorties digitales, des sorties analogiques, et un régulateur de tension qui ramènera la tension de fonctionnement à 5V [2].

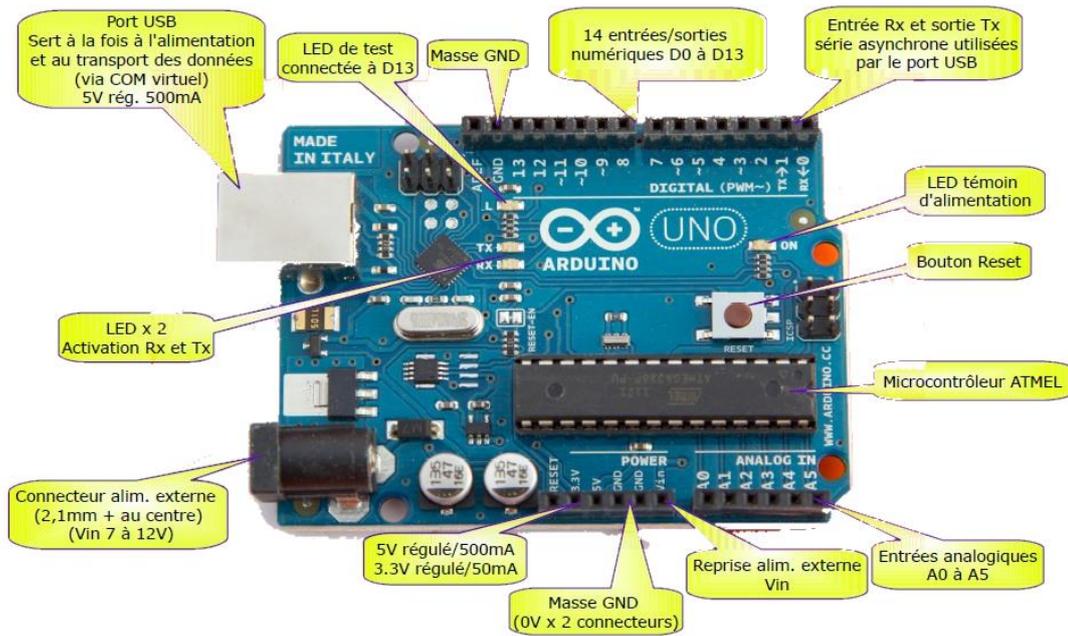


Figure IV. 3. Constitution d'Arduino Uno.

### IV.4.1.3. Caractéristiques techniques

Les caractéristiques techniques de la carte Arduino Uno sont résumées dans la figure ci-dessus :

Microcontrôleur	ATmega328
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'alimentation (recommandée)	7-12V
Tension d'alimentation (limites)	6-20V
Broches E/S numériques	14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM)
Broches d'entrées analogiques	6 (utilisables en broches E/S numériques)
Intensité maxi disponible par broche E/S (5V)	40 mA (ATTENTION : 200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S)
Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V	50 mA
Intensité maxi disponible pour la sortie 5V	Fonction de l'alimentation utilisée - 500 mA max si port USB utilisé seul
Mémoire Programme Flash	32 KB (ATmega328) dont 0.5 KB sont utilisés par le bootloader
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	2 KB (ATmega328)
Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)	1 KB (ATmega328)
Vitesse d'horloge	16 MHz

Figure IV. 4. Caractéristiques techniques de la carte Arduino Uno.

#### IV.4.1.4. Programmation de la carte Arduino Uno

Afin de fonctionner, l'Arduino Uno doit être tout d'abord programmé. Un programme destiné à ce type de carte s'appelle un sketch. La mise en œuvre est relativement simple [2] :

- Tout d'abord, il faut télécharger l'environnement de développement **Arduino IDE**. Ce logiciel va d'une part installer tous les pilotes nécessaires. Il pourra être utilisé avec n'importe quel type de carte relativement compatible au Arduino, mais également avec d'autres types de cartes dérivées, comme les NodeMCU, qui couplent un circuit wifi et un Arduino Nano. Il permet d'autre part de vérifier l'intégrité du code avant de l'envoyer à la carte.
- Brancher la carte à l'aide d'un câble USB et indiquer au logiciel le port COM sur lequel l'Arduino est branché.
- Télécharger les éventuelles bibliothèques nécessaires au sketch (comme la bibliothèque wifi en cas d'utilisation avec un circuit wifi ESP8266).
- Entrer le code du programme (langage C) et compiler et téléverser le code sur l'Arduino.

#### IV.4.2. Afficheur LCD (Liquid Crystal Display)

##### IV.4.2.1. Définition

LCD est l'abréviation du terme anglais Liquid Crystal Display qui signifie en français écran à cristaux liquides. D'où afficheur LCD.

L'afficheur LCD est en particulier une interface visuelle entre un système (projet) et l'homme (utilisateur). Son rôle est de transmettre les informations utiles d'un système à un utilisateur. Il affichera donc des données susceptibles d'être exploiter par l'utilisateur d'un système.

Cet afficheur LCD est un module pratique et facile à utiliser pour afficher des informations sur deux lignes de 16 caractères chacune. Il se raccorde sur un microcontrôleur (Arduino ou Raspberry Pi par exemple) via le bus I2C et ne nécessite que 4 broches au dos de l'écran. Il dispose d'un rétro-éclairage vert qui met en valeur les caractères blancs. Le contraste est ajustable via un potentiomètre. L'adresse I2C du module peut être modifiée en fonction des jumpers A1, A2 et A3. Ce module est idéal pour réaliser des projets interactifs avec un écran LCD sans utiliser trop de broches du microcontrôleur [3].

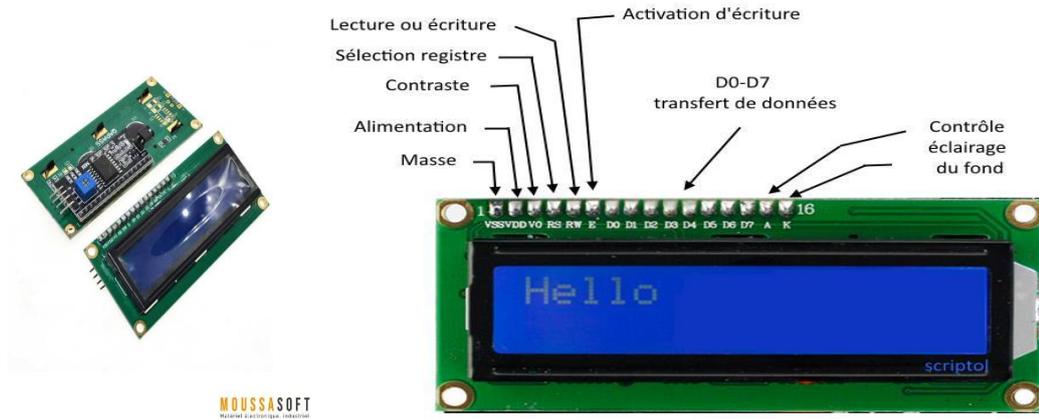


Figure IV. 5. Afficheur LCD.

#### IV.4.2.2. Caractéristiques techniques

- 2 lignes de 16 caractères.
- Rétro-éclairage bleu, caractères blancs.
- I2C, adresse de base 0x20.
- 8 adresses disponibles en fonction des jumpers A1, A2 et A3.
- Alimentation : 5V.
- Dimensions : 36 x 79 x 20 mm.
- Poids : 40 grammes.

#### IV.4.2.3. Utilisation d'un LCD sous Arduino

Les cartes Arduino sont souvent associées à des afficheurs LCD comme l'afficheur LCD I2C 2×16. L'utilisation d'un afficheur LCD avec une carte Arduino permet d'afficher des informations de manière pratique dans des projets électroniques [4].

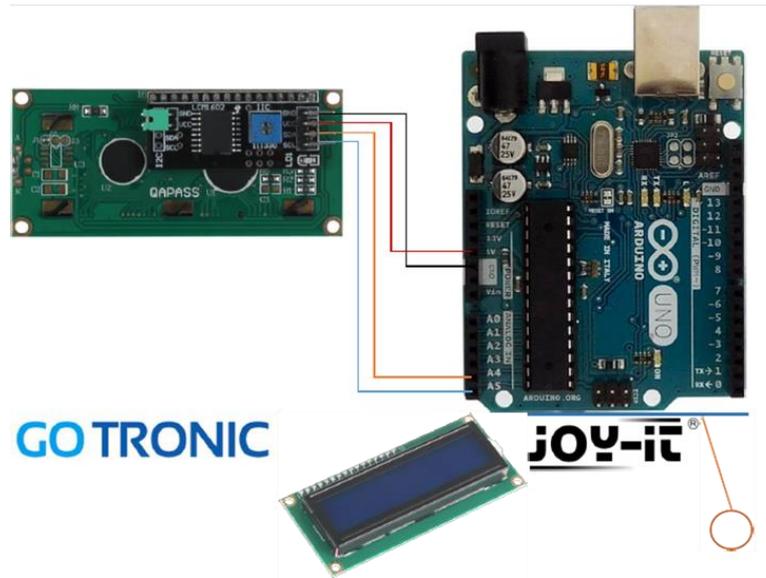


Figure IV. 6. Connexion d'écran LCD avec Arduino.

### IV.4.3. Capteur ultrasonique HC-SR04

#### IV.4.3.1. Définition

Les capteurs à ultrasons sont des appareils qui utilisent les ondes sonores de haute fréquence, inaudibles pour l'oreille humaine, pour détecter la présence des objets ou déterminer la distance entre l'objet et le capteur. Ils fonctionnent en émettant une courte impulsion d'ultrasons, qui se réfléchit sur l'objet et revient au capteur. La durée du temps écoulé entre l'émission et la réception de l'impulsion est mesurée et convertie en distance, en utilisant la vitesse du son dans l'air.

Les capteurs à ultrasons sont largement utilisés dans de nombreux domaines, tels que la mesure des distances, la détection d'obstacles, le contrôle de niveau et la mesure de débit.

Ils sont appréciés pour leur simplicité, leur faible coût et leur robustesse, ce qui les rend adaptés à une grande variété de produits nécessitant une détection, un contrôle ou une mesure. Cependant, il existe certaines limites à prendre en compte lors de l'utilisation de capteurs à ultrasons. Les conditions environnementales, telles que la température et l'humidité, peuvent affecter la précision des mesures. De plus, les matériaux souples, tels que le coton, les textiles, le caoutchouc-mousse ou le feutre, peuvent absorber ou diffuser les ondes ultrasonores, ce qui peut affecter les mesures.

Certains capteurs à ultrasons peuvent être configurés pour fonctionner dans des environnements à haute température ou pour communiquer avec d'autres appareils via des interfaces telles que RS-232... [5].



Figure IV. 7. Capteur ultrason HC-SR04.

#### IV.4.3.2. Description du capteur ultrason

Le raccordement des capteurs ultrasons nécessitent de brancher quatre pins : VCC, Trig, Echo et GND.

Broche	Description
VCC	Il s'agit de la broche d'alimentation. Elle nécessite généralement une entrée de 5V courant continu, la rendant directement compatible avec des cartes comme Arduino.
Trig (Déclenchement)	Cette broche est utilisée pour initier le capteur à émettre une onde ultrasonore. En envoyant une impulsion haute d'au moins 10 $\mu$ s à cette broche, le HC-SR04 émettra une série de 8 impulsions d'ultrasons à 40 kHz.
Echo	Une fois l'onde ultrasonore émise et qu'elle rebondit après avoir frappé un objet, la broche Echo fournit une impulsion de sortie. La largeur de cette impulsion est proportionnelle à la distance de l'objet par rapport au capteur. En mesurant la durée de cette impulsion, Arduino peut déterminer la distance jusqu'à l'objet.
GND (Masse)	Cette broche est connectée à la masse du circuit.

#### ➤ Caractéristiques techniques

- Dimensions : 45 mm x 20 mm x 15 mm
- Plage de mesure : 2 cm à 400 cm

- Résolution de la mesure : 0.3 cm
- Angle de mesure efficace : 15 °
- Largeur d'impulsion sur l'entrée de déclenchement : 10  $\mu$ s (Trigger Input Pulse width).

#### ➤ Spécifications et limites

Paramètres	Min	Type	Max	Unité
Tension d'alimentation	4.5	5.0	5.5	V
Courant de repos	1.5	2.0	2.5	mA
Courant de fonctionnement	10	15	20	mA
Fréquence des ultrasons	-	40	-	KHz

#### ➤ Spectre des ondes sonores

L'oreille humaine ne peut écouter que les sons dont la fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 KHz. Ce sont les sons audibles. En dessous de 20 Hz, ce sont les infrasons. Au-dessus de 20 KHz, ce sont les ultrasons.

0 Hz	20 Hz	20KHz
Infraction (non audible)	Son audible	Ultrason (non audible)

#### ➤ Vitesse de propagation

La vitesse de propagation de l'onde acoustique dépend de la température, de l'altitude et du milieu de propagation. Les tableaux suivants illustrent sa dépendance en fonction de ces paramètres.

T [°C]	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
<b>Vitesse (Air)</b>	325,4	328,5	331,5	334,5	337,5	340,5	343,4	346,3	349,2

Altitude	0	400	800	1 000	2 000	4 000	8 000	10 000	12 000
<b>Temps</b>	15,00	12,40	9,80	8,50	2,00	-10,98	-36,90	-49,90	-62,90
<b>Vitesse</b>	340,5	338,8	337,2	336,4	332,5	324,6	308,1	299,5	295,1

Milieu	Air	Eau	PVC	Béton	Glace	Hêtre	Verre	Acier	Granite
<b>Vitesse</b>	340,5	1 480	2 200	3 100	3 200	3 300	5 300	5 750	6 200

#### IV.4.3.3. Principe de fonctionnement

Dans ce travail, le capteur ultrasons HC-SR04 est principalement utilisé pour la mesure de distance. En émettant des ondes ultrasonores et en mesurant le temps pris par ces ondes pour rebondir après avoir frappé un objet, le HC-SR04 peut déterminer avec précision la distance à laquelle cet objet se trouve.

Le fonctionnement du capteur HC-SR04 est assez simple. Il comporte deux éléments principaux, un émetteur et un récepteur ultrasonores. Voici les étapes clés du fonctionnement du capteur :

1. Lorsque le capteur est alimenté, l'émetteur envoie une série de 8 impulsions ultrasoniques de  $10\mu\text{s}$  à une fréquence spécifique (généralement de 40 kHz).
2. Lorsqu'une impulsion sonore atteint un objet, elle rebondit et est renvoyée vers le récepteur ultrasonore comme un écho.
3. Le capteur mesure le temps entre le moment où l'impulsion a été émise et celui où l'écho a été reçu.
4. En utilisant la vitesse connue du son dans l'air (environ 343 m/s ou 34,3 cm/ $\mu\text{s}$ ) et la durée de l'écho mesurée, le capteur calcule la distance jusqu'à l'objet en utilisant la formule :  
Distance = (durée de l'écho / 2) \* vitesse du son
5. Le résultat est ensuite converti en une distance numérique et envoyée au Arduino via une sortie numérique [6].

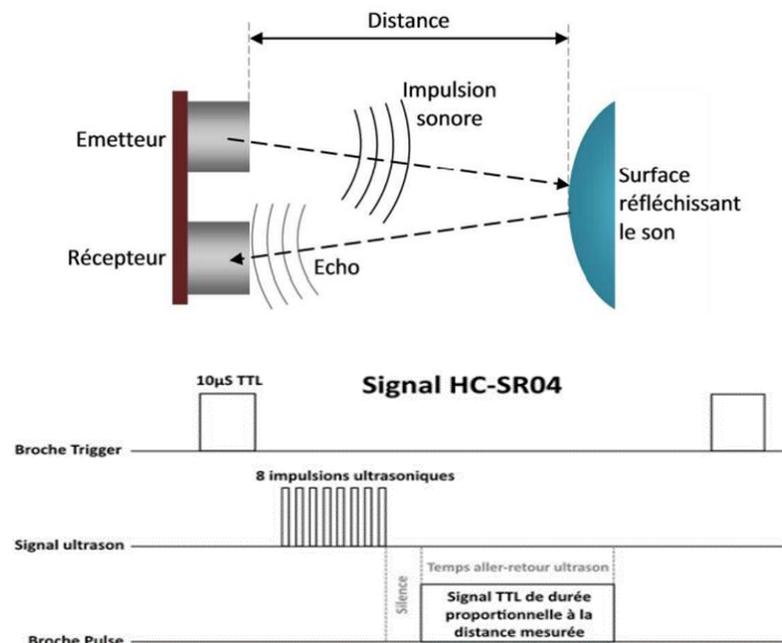


Figure IV. 8. Mode de fonctionnement d'un capteur ultrason.

#### IV.4.3.4. Connexion d'un capteur à une carte Arduino

1. Connectez la broche VCC du HC-SR04 à la broche 5V de la carte Arduino Uno. Cela garantit que le capteur reçoit l'énergie nécessaire à son fonctionnement.
2. Connectez la broche GND (terre) du HC-SR04 à l'une des broches de terre (GND) de l'Arduino. Cela crée une masse électrique commune entre le capteur et l'Arduino.
3. Connectez la broche Trig du HC-SR04 à la broche numérique de l'Arduino, par ex. Broche D12. Cette broche est chargée d'envoyer un signal pour allumer le capteur émet des ondes ultrasonores.
4. Connectez la broche Echo du HC-SR04 à une borne numérique de l'Arduino, telle qu'une broche D11. Cette broche détecte l'écho des ondes ultrasonores après leur réflexion sur un objet [6].

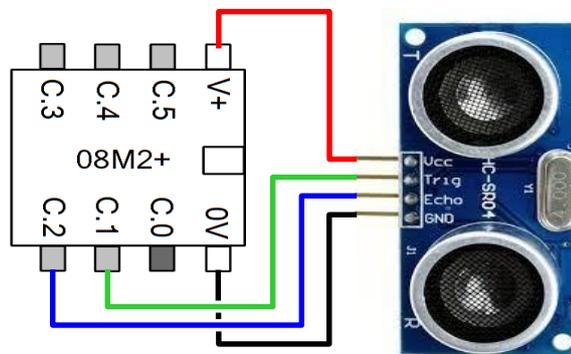


Figure IV. 9. Connexion du HC-SR04 à une carte Arduino.

#### IV.4.4. Relais électrique 5V (SRD-05VDC-SL-C)

##### IV.4.4.1. Définition

Un Relais est un dispositif électronique qui permet de commander un circuit électrique à partir d'un signal de commande de faible puissance, comme celui produit par une carte Arduino. En utilisant un relais avec une Arduino, vous pouvez contrôler des appareils électriques de haute puissance, tels que des moteurs ou des appareils électroménagers, à l'aide de commandes numériques [7].



Figure IV. 10. Relais électrique SRD-05VDC-SL-C.

#### IV.4.4.2. Principe de fonctionnement

Le relais est constitué d'un électroaimant et d'un contacteur mécanique. Lorsque le courant est suffisamment important sur la borne d'entrée, le solénoïde se magnétise ce qui force le contacteur à fermer le circuit de puissance. Comme il n'y a pas de liaison mécanique entre le circuit de commande et le circuit de puissance (actionnement magnétique), il y a une isolation galvanique entre les deux circuits ; ce qui permet de protéger le circuit de commande [8].

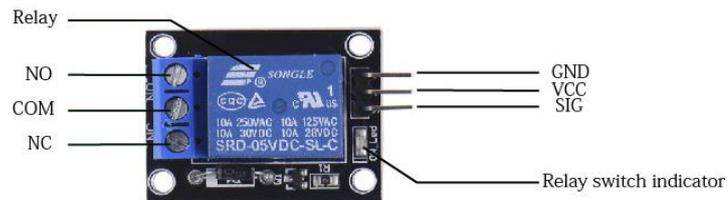


Figure IV. 11. Bornes d'un relais électrique.

Nous allons voir ici le branchement d'un module relais qui est souvent présent dans les kits d'électronique. Il y a trois broches d'entrée (Signal, VCC, GND) comme pour un servomoteur. Le relais se branche généralement sur une sortie digitale du microcontrôleur. Il y a généralement un bornier 3 plots en sortie du module qui correspond aux sorties Naturellement Ouvert (NO), commun (COM) et Naturellement fermé (NC). L'appareil en sortie sera relié à la borne COM et la borne NC ou NO selon votre utilisation.

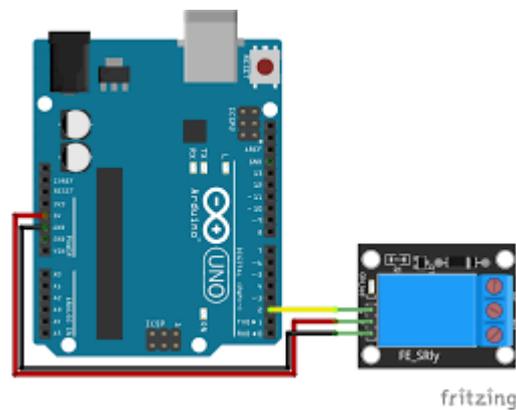


Figure IV. 12. Connexion d'un relais à Arduino Uno.

#### A. Modes de relais

Le relais fonctionne avec deux modes possibles : le circuit normalement ouvert et celui normalement fermé [9].

- **Mode normalement ouvert**

Pour utiliser ce mode, vous devez brancher la masse de votre composant à haute tension sur le pin tout à droite. La source de tension externe sera branchée entre la masse du relais (broche du milieu) et l'alimentation de votre composant à haute tension.

Dans cette configuration, si la broche est à l'état bas alors le relais sera un circuit ouvert, c'est à dire que votre composant sera éteint.

A l'inverse, si la broche est à l'état haut, le relais est fermé, c'est à dire que le composant est allumé.

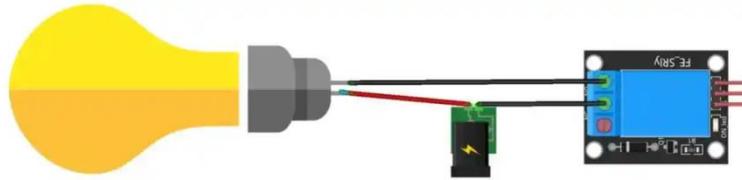


Figure IV. 13. Relais électrique en mode NO.

- **Mode normalement fermé**

Pour utiliser ce mode, vous devez brancher la masse de votre composant à haute tension sur la masse du relais. La source de tension externe se branche elle sur la pin "normalement fermé" du relais.

Dans cette configuration, si la broche est à l'état bas le relais est fermé, c'est à dire que votre composant sera allumé.

A l'inverse, si la broche est à l'état haut, le relais est un circuit ouvert, c'est à dire que le composant est éteint.

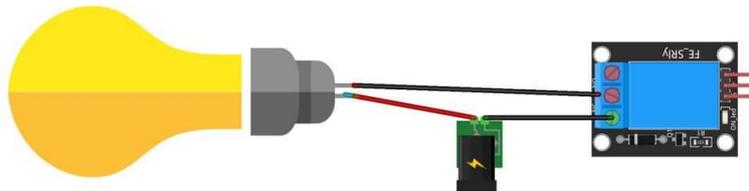


Figure IV. 14. Relais électrique en mode NC.

#### IV.4.5. Fils de connexion

Les fils de connexion sont essentiels pour relier les composants électroniques dans un circuit électronique, y compris une carte Arduino. Il existe différents types de fils de connexion en fonction de leur application, comme les fils à gaine thermo rétractable, les fils à cosse et les fils tressés [10].



Figure IV. 15. Fils 20 cm Arduino.

#### IV.4.6. Bobines

Dans un système de transfert d'énergie sans fil (TESF), les bobines jouent un rôle fondamental en permettant l'induction électromagnétique nécessaire pour transférer de l'énergie d'un émetteur à un récepteur. Il existe deux types de bobine, primaire (émettrice) et secondaire (réceptrice).

##### IV.4.6.1. Bobine primaire (émettrice)

La bobine émettrice est reliée à une source de courant continue (une batterie 5V). Lorsque ce courant traverse la bobine, il crée un champ magnétique oscillant autour d'elle.

Ce champ magnétique oscillant peut s'étendre à une certaine distance, dépendant de la fréquence et de la puissance du courant, ainsi que de la taille et de la configuration de la bobine.

L'utilisation d'un transistor et d'une résistance dans ce circuit a plusieurs raisons importantes :

- **Transistor :** Le transistor est souvent utilisé pour créer des oscillations dans le circuit. Il peut agir comme un interrupteur rapide, permettant au courant de circuler de manière intermittente à une fréquence élevée. Ces oscillations sont cruciales pour générer un champ magnétique alternatif, qui est nécessaire pour l'induction électromagnétique dans la bobine secondaire.
- **Résistance :** La résistance peut être utilisée pour contrôler le courant dans le circuit, stabiliser les oscillations et protéger le transistor contre les surintensités.

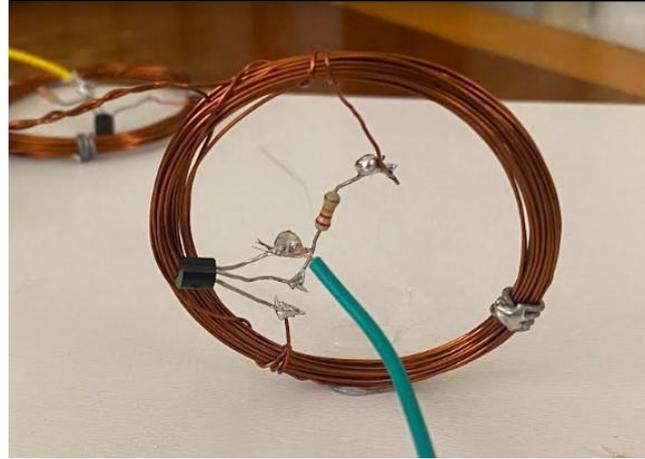


Figure IV. 16. Bobine primaire.

#### IV.4.6.2. Bobine secondaire (réceptrice)

La bobine réceptrice est positionnée à proximité de la bobine primaire, dans le champ magnétique généré par cette dernière. Ce champ magnétique oscillant induit un courant électrique dans la bobine réceptrice, grâce à la loi de Faraday de l'induction électromagnétique.

La LED dans la bobine secondaire sert principalement à démontrer visuellement le transfert d'énergie sans fil de manière simple et efficace, tout en offrant un moyen facile de tester et de vérifier le fonctionnement du système.



Figure IV. 17. Bobine secondaire.

Le transfert d'énergie sans fil via des bobines repose sur le principe de l'induction électromagnétique. En générant un champ magnétique alternatif avec une bobine primaire et en captant ce champ avec une bobine secondaire, il est possible d'induire un courant dans la bobine secondaire et d'alimenter des dispositifs comme une LED. Ce processus dépend de divers facteurs, tels que la distance entre les bobines, la fréquence du signal et le nombre de spires, pour une efficacité optimale.



Figure IV. 18. Deux bobines utilisées pour le TEF, avec la LED allumée, indiquant un transfert d'énergie réussi.

## IV.5. Réalisation du projet

L'objectif principal de notre projet est de proposer, développer et mettre en œuvre un outil innovant qui gère la recharge des voitures électriques, dans les parkings dotés de la technologie de recharge sans contact, d'une manière intelligente.

### IV.5.1. Schéma réalisé

Le schéma proposé et réalisé pour le projet est illustré par la figure ci-dessous. Le parking utilisé comme prototype miniaturisé est composé de deux voix station 1 et 2.

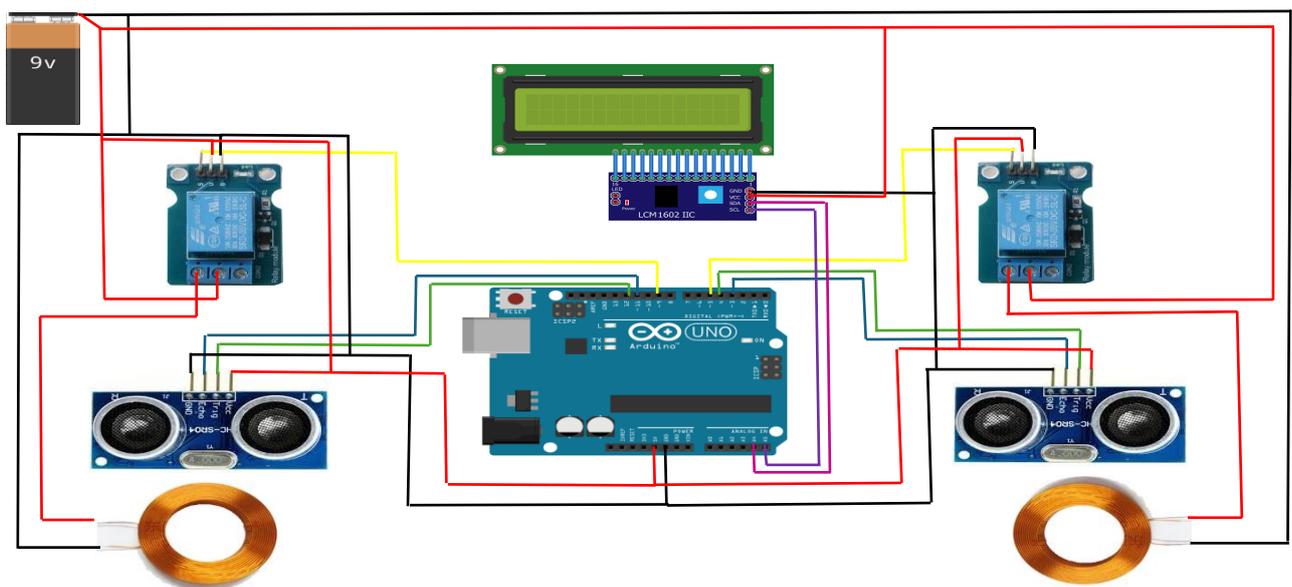


Figure IV. 19. Schéma du projet réalisé.

### IV.5.2. Résultats obtenus

Premièrement, si la voiture est dans la station 1, le capteur détecte sa présence et envoie un signal de commande à l'Arduino, qui active le relais 1 pour commencer la recharge. L'afficheur LCD indique alors "stat\_ 1 ON". D'autre part, si la station 2 est vide, le relais 2 est resté désactiver et l'écran LCD affiche "stat\_ 2 OFF".

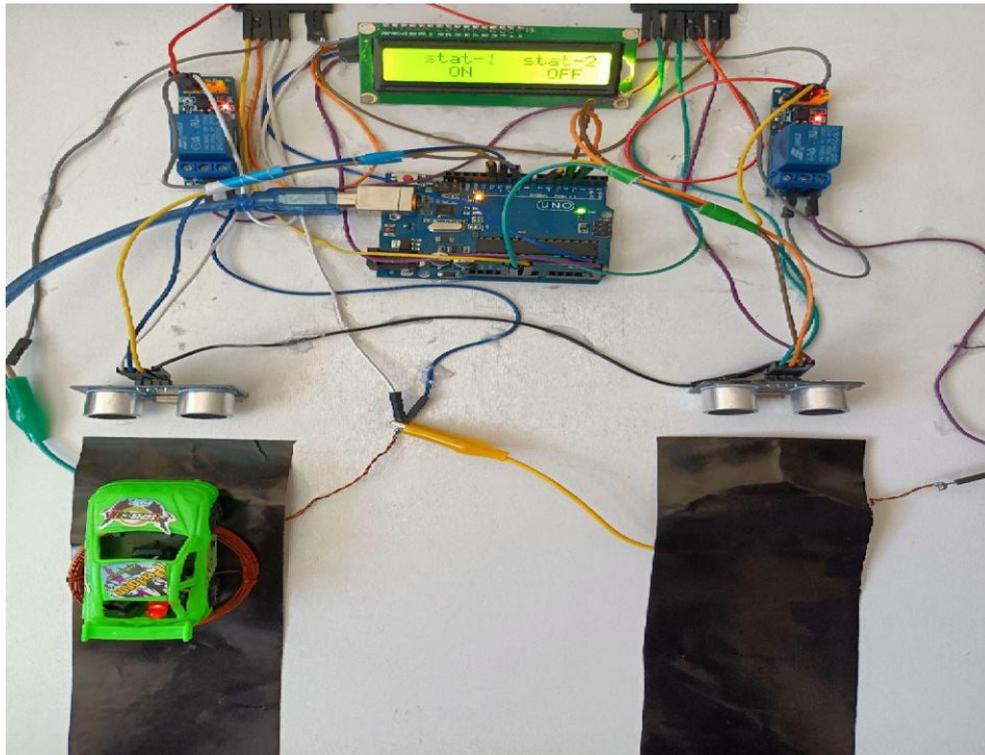


Figure IV. 20. Station 1 en charge.

D'une part, si la voiture est en station 2, le capteur 2 détecte la présence de la voiture et envoie l'ordre à l'Arduino, qui actionne le relais 2 pour fermer le circuit et commencer la recharge. Ainsi, l'afficheur LCD indique "Stat\_ 2 ON". D'autre part, si la station 1 reste vide, le relais 1 est resté désactiver et l'écran LCD affiche "Stat\_ 1 OFF".

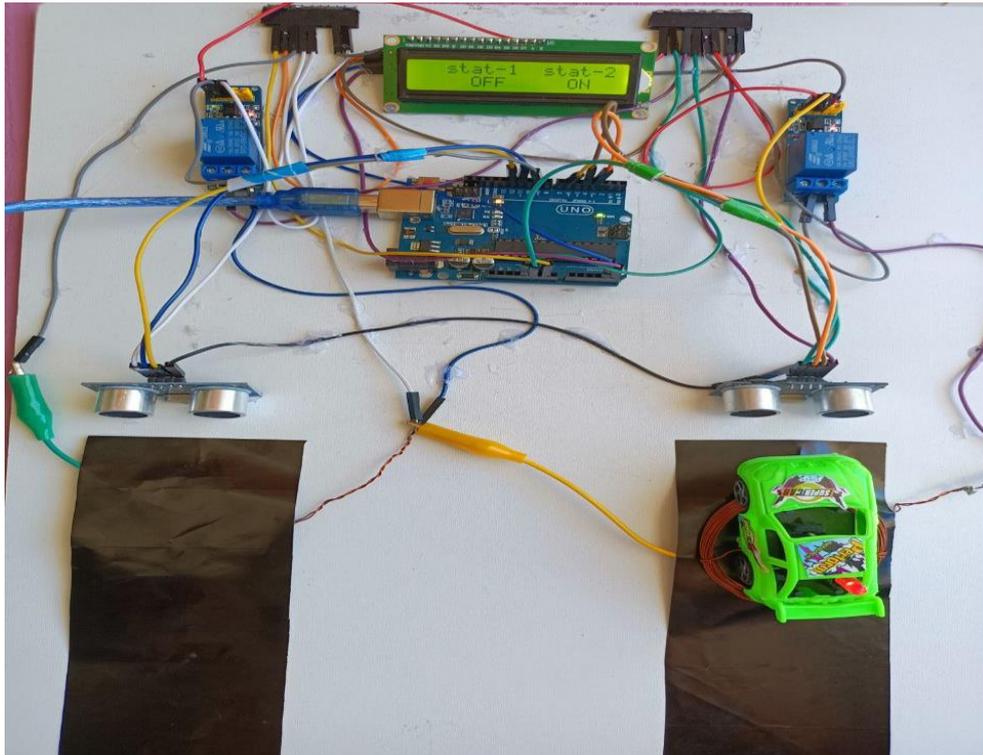


Figure IV. 21. Station 2 en charge.

Lorsque les deux stations sont occupées, les capteurs détectent simultanément la présence des voitures. Dans ce cas, des signaux de commande sont envoyés à la carte Arduino qui active les relais correspondants pour commencer la recharge. L'écran LCD indique l'état de la recharge en temps réel "Stat\_1 ON" et "Stat\_2 ON".

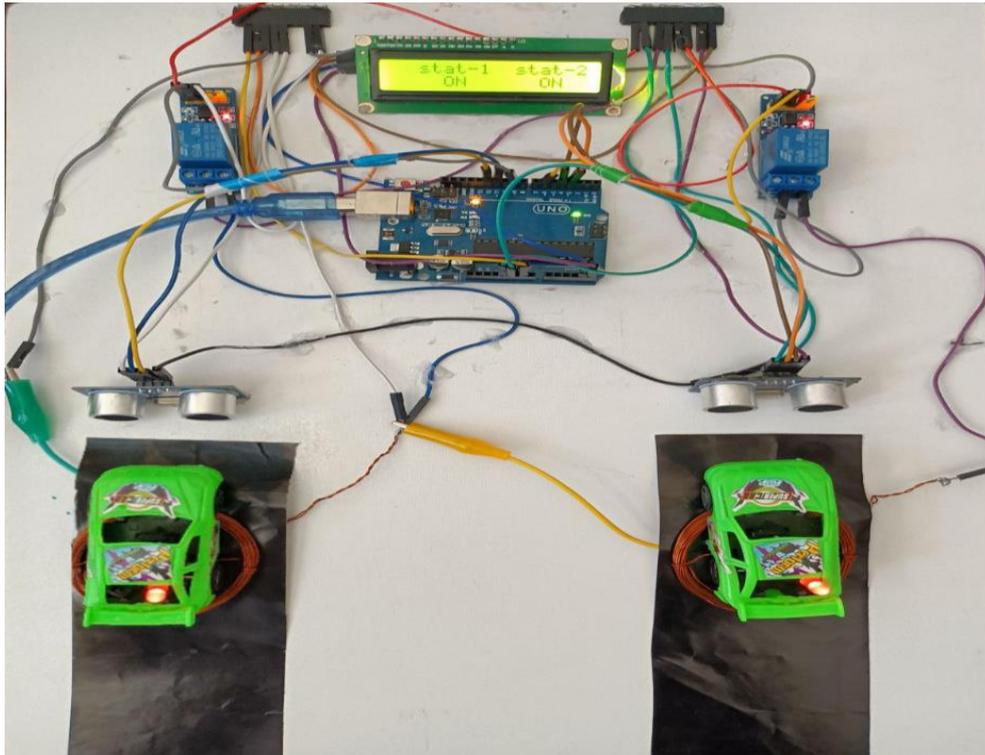


Figure IV. 22. Station 1 et 2 en charge.

Lorsque les deux stations sont vides, les capteurs ne détectent aucune présence de voitures. Par conséquent, aucun signal n'est envoyé à la carte Arduino et les relais correspondants restent désactivés. L'écran LCD affiche que la recharge est désactivée "Stat\_1 OFF" et "Stat\_2 OFF".

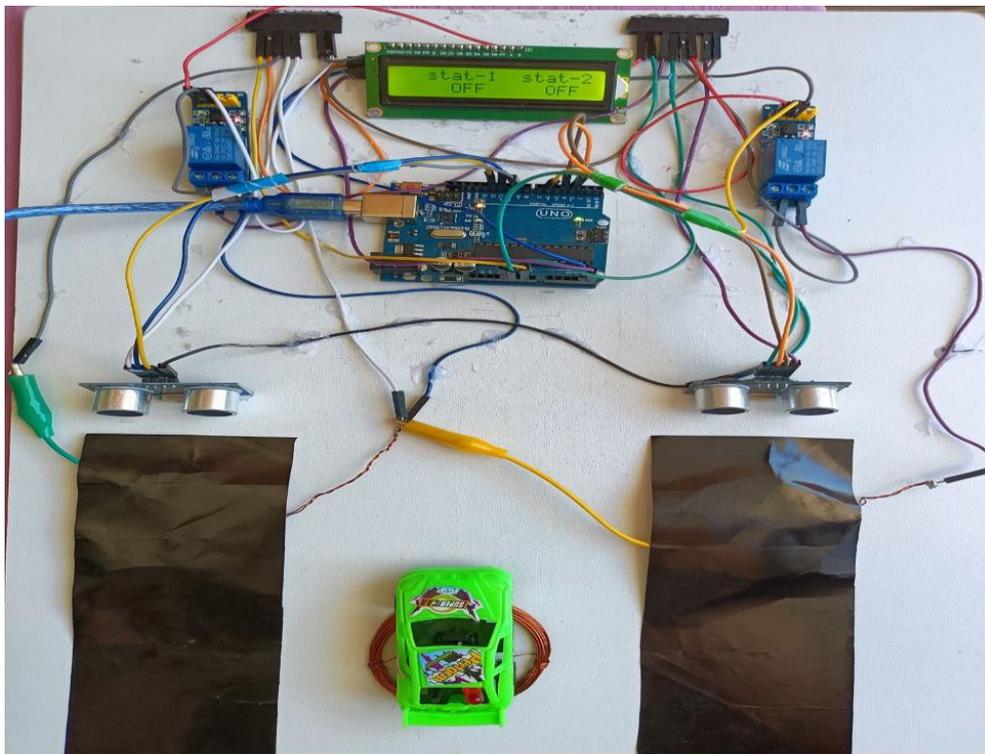


Figure IV. 23. Station 1 et 2 en repos.

A partir des résultats obtenus pour les différents cas traités, on constate que l'outil de gestion d'énergie dans un système de recharge sans contact développé et mis en œuvre assure une gestion intelligente et optimale au niveau de la consommation de l'énergie électrique.

## **IV.6. Conclusion**

En conclusion, l'outil de recharge sans fil pour véhicules électriques développé et mis en œuvre, qui intègre un système de gestion optimisée de l'énergie, représente une solution innovante et prometteuse pour répondre aux défis de la mobilité électrique. Il offre une recharge efficace tout en assurant la protection du matériel et des personnes contre les risques associés aux champs magnétiques. L'interface utilisateur intuitive permet une surveillance facile et transparente de la progression de la recharge. Cet outil non seulement facilite l'adoption des véhicules électriques en réduisant les obstacles liés à la recharge, mais il contribue également à la promotion d'une mobilité urbaine durable et écologique. Avec ses capacités d'adaptation et son potentiel pour des développements futurs, il ouvre la voie à des avancées encore plus significatives dans le domaine de la technologie de recharge sans fil et de la mobilité électrique.

## Références

- [1] Université Ibn Zohr.
- [2] Sébastien.Bellamy, «steemit,» Mars 2018. [En ligne]. Available: <https://steemit.com/diy/@sebbbl/prsentationdelarduinouno-d1bd4mhltx>.
- [3] «letmeknow,» [En ligne]. Available: <https://letmeknow.fr/fr/ecrans/167-afficheur-16-caracteres-2-lignes-i2c-vert-4894479454558.html>.
- [4] [En ligne]. Available: <https://www.robotique.site/tutoriel/la-carte-arduino-uno-et-lafficheur-lcd-i2c-2x16/>.
- [5] J. Smoot, «ECINEWS Electronique - Composants – Instrumentation,» [En ligne]. Available: [https://www.ecinews.fr/fr/content\\_sponsorship/tout-ce-quil-faut-savoir-sur-les-capteurs-a-ultrasons/](https://www.ecinews.fr/fr/content_sponsorship/tout-ce-quil-faut-savoir-sur-les-capteurs-a-ultrasons/).
- [6] [En ligne]. Available: <https://innovation.iha.unistra.fr/books/robotique-educative/page/quest-ce-quun-capteur-a-ultrasons/export/pdf>.
- [7] Daraif.Kawter, «Comment utiliser un module Relais avec Arduino,» [En ligne]. Available: <https://www.moussasoft.com/relais-avec-arduino/>.
- [8] «Utilisation d'un module relais avec Arduino,» 2021. [En ligne]. Available: <https://www.aranacorp.com/fr/utilisation-dun-module-relais-avec-arduino/>.
- [9] «relais factory,» [En ligne]. Available: <https://arduinofactory.fr/relais/>.
- [10] M. Y. Yassir, *Allumer Et Éteindre Des LEDs Avec Smartphone Et Arduino*.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

La recharge sans contact des véhicules électriques constitue un axe de recherche essentiel et en pleine expansion dans le secteur de la mobilité durable. Elle offre une solution pratique et efficace pour répondre aux besoins croissants en recharge des véhicules électriques, tout en réduisant la dépendance aux câbles et aux bornes de recharge traditionnelles.

La mise en œuvre des systèmes de recharge sans contact nécessite une approche rigoureuse et intégrée, impliquant des avancées dans la modélisation électromagnétique, la gestion de l'énergie et la sécurité. Un modèle analytique basé sur des hypothèses simplificatrices peut fournir une solution rapide et précise pour le développement de ces systèmes, assurant ainsi une performance optimale et une précision acceptable dans l'évaluation des grandeurs globales.

Notre recherche s'inscrit dans le cadre du développement d'un outil intelligent de gestion d'énergie optimale qui nécessite un transfert d'énergie sans contact pour véhicules électriques. Cette gestion nous permet de minimiser et de conserver les pertes d'énergie pendant l'opération de recharge, tout en assurant la sécurité du matériel et des personnes à proximité. Pour concrétiser cette gestion, nous avons réalisé un prototype de système de recharge sans contact et intelligent pour véhicules électriques. Ce système utilise deux capteurs ultrasoniques stratégiquement placés pour détecter la présence d'une voiture électrique lorsqu'elle s'approche d'un espace de stationnement. Les capteurs envoient des données de distance à un microcontrôleur (Arduino Uno), qui agit comme le cerveau du système. Le microcontrôleur analyse ces données et contrôle un relais électrique.

Lorsque la voiture est correctement positionnée, le microcontrôleur active le relais, fermant ainsi le circuit de recharge sans fil et permettant le début de la recharge. Le relais joue un rôle crucial en tant qu'interrupteur contrôlé, assurant que la recharge ne commence que lorsque toutes les conditions sont remplies. Une fois que les batteries sont complètement ou partiellement rechargées, un des capteurs détecte le déplacement de la voiture et envoie un signal au microcontrôleur. Celui-ci désactive alors le relais, arrêtant le processus de recharge.

Après avoir mis en œuvre et analysé les résultats obtenus, nous avons pu confirmer la capacité de l'outil développé à assurer une gestion optimale de l'énergie en activant et désactivant un circuit de recharge en fonction des conditions détectées.

En ce qui concerne les limites de notre travail, étant donné qu'il s'agit d'un prototype à petite échelle, nous ne sommes pas en mesure de fournir des résultats basés sur des mesures en conditions réelles vu l'indisponibilité des moyennes et matériels nécessaires.

## Résumé

Dans ce projet, l'objectif principale est de concevoir, développer et mettre en œuvre un prototype intelligent assurant une gestion optimale de l'énergie dans un système de recharge sans fil pour les voitures électriques. Le défi principal réside dans le transfert efficace de l'énergie électrique tout en garantissant la sécurité des personnes dans les parkings dédiés au chargement, ainsi que la protection des appareils électriques contre les interférences susceptibles d'affecter leur performance.

## Abstract

In this project, the main objective is to design, develop, and implement an intelligent prototype ensuring optimal energy management in a wireless charging system for electric vehicles. The primary challenge lies in efficiently transferring electrical energy while ensuring the safety of individuals in dedicated charging parking areas, as well as protecting electrical devices from interference that could affect their performance.

## ملخص

في هذا البحث يتم توجيه العمل نحو تصميم وتطوير نموذج أولي ذكي يضمن إدارة مثلى للطاقة في نظام شحن لاسلكي للسيارات الكهربائية. ويكمن التحدي الرئيسي في ضرورة نقل الطاقة الكهربائية بكفاءة عالية مع ضمان سلامة الأشخاص المتواجدين في مواقف السيارات المخصصة للشحن، بالإضافة إلى حماية الأجهزة الكهربائية من خطر التشويشات التي التي يمكن أن تؤثر على أدائها.