

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohammed Seddik Ben Yahia
Jijel



جامعة محمد الصديق بن يحي جيجل
كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département D'Électrotechnique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de :

Master en Electromécanique

Option : Electromécanique

Thème

**Etude et simulation d'un système de transfert d'énergie à
résonance**

Réalisée Par :

Mr / TAOUTAOU Karim

Et

Mr / BOUDECHICHA Abdeldjalil

Proposé et dirigé par :

Pr / ALLAG Hicham

Promotion 2021

Remerciement

On remercie Dieu le tout puissant qui nous a donné la force pour aller jusqu'au bout de ce travail.

On exprime toute notre gratitude à notre encadreur Professeur Allag Hicham pour ses précieux conseils et ses directives.

On remercie tout particulièrement les membres du jury pour avoir accepté de participer en tant qu'examineurs à notre soutenance.

On tient enfin à remercier tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail spécialement la doctorante Drici Imene.

Qu'ils acceptent nos humbles remerciements.

DÉDICACES

GRACE à DIEU LE TOUT PUISSANT, J'AI ACHEVÉ LA
RÉALISATION DE CE MODESTE TRAVAIL QUE JE TIEN TRÈS

CHALEUREUSEMENT à LE DÉDIER à :

A MA CHÈRE MÈRE GHANIA

A MON PÈRE AZZOUZ

A MES FRÈRES ET SCEURS

ZINO, WALID, IBTISSEME, HOUDA ET ZINA

A LA FAMILLE DE MON ONCLE PATERNEL,

SON ÉPOUSE SAMIA ZOUIKRI ET SA FILLE ROUMAÏSSA.....

JE VOUS REMERCIE TOUS.

BOUDECHICHA ABDELJALIL.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Ma chère mère

*Je te remercie pour le soutien et l'amour que tu m'as porté depuis mon enfance et
j'espère que ta bénédiction m'accompagnera toujours*

Mon cher père

*Qui a été toujours à mes cotés durant toutes les années d'études, qui a veillé à me donner
l'aide, à m'encourager et me soutenir, celui qui s'est sacrifié pour voir réussir.*

C'est à vous deux que je dois cette réussite et je suis fière de vous l'offrir.

*À mes chères sœurs : **Imene, Dahine** et **Bouchra** je vous souhaite que du bonheur et de la
réussite dans vos études et vos vies.*

*Mes amis intimes : **Moussa Amine, Mohamed Lamine.***

TAOUTAOU KARIM

SOMMAIRE

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction générale	1
Introduction :	3
I. Résonance et Ferro résonance :	3
I.1. Résonance :	3
I.1.1. Résonance série :	4
I.1.2. Résonance parallèle :	6
I.2. Ferro résonance :	7
I.2.1 Ferro résonance série :	7
I.2.2 Ferro résonance parallèle :	9
I.3. Mécanisme de ferrorésonance :	11
I.4 Différence entre la ferrorésonance et la résonance :	12
I.5 Conditions et interprétation physique de la ferrorésonance :	13
I.6 Exemple simple de Ferro résonance dans un transformateur monophasé :	13
I.7 Classification des régimes Ferro résonants :	14
Conclusion :	15
Introduction.....	17
II.1 L'état de l'art :	17
II.2 Quelques exemples :[14].....	18
II.2.1 Recharge statique :	18
II.2.2 Recharge dynamique	20
II.3 Les vecteurs de transfert d'énergie sans contact :	22
II.4 Principe de la transmission d'énergie sans fil :	24

II.5 Domaines d’application de la transmission d’énergie sans fil	25
II.5.1 Domaine industriel :	25
II.5.2 Domaine du grand public :	25
II.5.3 Domaine automobile :	26
II.6 Les exigences du transfert d’énergie sans contact vers un véhicule en mouvement.....	29
II.7 Les avantages:	31
II.8 Les inconvénients :	32
Conclusion :	33
Introduction :	34
III.1 MPPT définition :	34
III.2 Modèle de simulation :	35
III.2.1 Résultats de simulation et interprétations :	35
III.2.1.1 Sans la poursuite de la fréquence de résonance :	37
III.2.1.2 Avec la poursuite de la fréquence de résonance :	39
III.2.1.3 Observation :	40
III.2.2 Influence de l’inductance sur la fréquence de résonance :	42
III.2.2.1 Résultats de simulation :	44
Conclusion :	46
Conclusion générale.....	47
Références bibliographiques	48

Liste des tableaux

Tableau II.1: Vecteurs de transfert d'énergie sans contact 23
Tableau III.1 : Tableau des paramètres utilisés. 35
Tableau III.2: Valeurs des inductances en fonction de la distance. 43
Tableau III.3 : Comparaison entre les fréquences simulées et celles calculées. 46

Liste des figures

Figure 1.1 : Circuit linéaire résonant.	4
Figure I.2 : Représentation de Fresnel d'un circuit RLC série alimenté par une tension E_S	4
Figure I.3 : Caractéristique de V_C , V_L , I et E_S en résonance.	5
Figure I.4 : Exemple de la forme de la surtension de résonance (pas de distorsion).	6
Figure I.5 : circuit R, L, C parallèle alimenté par une source de courant J	6
Figure I.6 : Circuit ferrorésonant série.	7
Figure I.7 : Caractéristique E-I (ou V-I) du circuit de ferrorésonance.	8
Figure I.8 : Ferrorésonance série - résolution graphique.	9
Figure I.9 : Circuit Ferro résonant parallèle.	9
Figure I.10 : Ferro résonance parallèle - résolution graphique.	12
Figure I.12 : Courbe de saturation d'un transformateur	14
Figure I.11 : Circuit ferrorésonant série simple. Dans le plan tension efficace-courant efficace en Négligeant les harmoniques.	14
Figure. II.1 : Transmission d'énergie par ondes radio - Nikola Tesla dans son Laboratoire de Colorado Springs	17
Figure. II.2 : Démonstrateur du Grand Bassin - Ile de la Réunion : a) Vue d'ensemble b) Réseau de 2376 rectennas.	19
Figure.II.3: Waseda Electric Bus.	19
Figure II.4 : Système WPT de Witricity.	20
Figure II.5 : Recharge par induction dynamique d'un véhicule électrique	21
Figure II.6 : Différents types de pistes, (a) piste à émetteur unique, (b) piste à émetteur segmenté.	21
Figure II.7: principe du transfert d'énergie capacitif pour véhicules électriques en mouvement	23
Figure II.8: principe du transfert d'énergie sans fil.	24
Figure II.9: Le mixeur sur la plaque à induction.	26

Figure II.10 : le principe de la recharge sans fil d'un véhicule électrique	27
Figure II.11 : Au premier plan la cellule de recharge, et en arrière-plan la voiture servant aux tests	27
Figure II.12 : Représentation du système Wit-3300 sur une voiture.....	28
Figure II.13 : bus électrique équipé de récepteur d'électricité sans fil	29
Figure III.1 : Modèle de simulation.....	37
Figure III.2: Fréquence sans poursuite	38
Figure III.3 : Puissance sans poursuite.....	38
Figure III.4 : Fréquence avec poursuite.....	39
Figure III.5 : Puissance avec poursuite.....	40
Figure III.6: Courant électrique aux bornes de la charge (RLC).....	40
Figure III.7 : Tension de la résistance.	41
Figure III.8 : Tension aux bornes de l'inductance et du condensateur.....	41
Figure III.9: Comparaison entre U_{RLC} et U_R	42
Figure III.10 : Expérience de Frédéric Legrand.	43
Figure III.11 : Inductance mutuelle en fonction de la distance entre deux bobines.[36] ...	43
Figure III.12: pour $L = 0,7$ mH.....	44
Figure III.13: Pour $L=0,21$ mH.	45
Figure III.14 : Pour $L=0,1$ mH	45

Introduction générale

Introduction générale

Au cours de ces dernières années, le secteur technologique a connu une croissance rapide dans tous les domaines. Parmi ces domaines, on cite les systèmes de transfert d'énergie sans contact qui ont connu un grand développement. En effet les méthodes de récupération et de transfert d'énergie reçoivent actuellement une attention très importante de la part de la communauté de recherche. On peut trouver alors les différentes applications ayant recours à ces systèmes ; domestique, santé, domaine militaire ou bien encore surveillance de phénomène environnementaux. [1]

Afin d'éviter les inconvénients des câbles, le transfert d'énergie par induction électromagnétique est une solution intéressante offrant plus de flexibilité. C'est une solution facile, robuste et résistante aux intempéries par rapport aux câbles généralement utilisés.

Aujourd'hui, pour des faibles distances, les dispositifs de transfert d'énergie à couplage inductif sont utilisés de plus en plus dans les produits de l'industrie et public pour l'alimentation sans contact. Cependant en raison de la limitation de la distance de transfert, cette technologie ne peut pas être utilisée car le rendement est extrêmement faible. Pour éviter cet inconvénient, on associe au système inductif des capacités de compensation. Le nouveau dispositif ainsi obtenu permet à travers la fréquence de résonance d'optimiser la puissance transmise et ainsi augmenter le rendement.

Dans ce travail, nous étudions un système de transfert d'énergie à résonance du point de vue commande afin de poursuivre la fréquence de résonance (tracking) pour obtenir un maximum de transfert d'énergie. Pour ce faire nous concevrons un modèle de poursuite à boucle fermé sous l'environnement Simulink de MATLAB.

Le mémoire est composé de trois chapitres dont le premier chapitre consiste à présenter des généralités sur la résonance et la Ferro résonance (série et parallèle) et la différence entre elles.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons le transfert d'énergie par induction et ses différentes applications.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation d'un circuit résonant parallèle bien déterminé avec une étude paramétrique qui sera comparée aux résultats théoriques.

Enfin, on terminera ce mémoire par une conclusion.

Chapitre I :

*Phénomènes de Résonance et de
Ferro résonance et le transfert
d'énergie sans contact*

Introduction :

On fait souvent des analogies entre les résonances électriques et les résonances mécaniques où l'énergie passe alternativement de la forme énergie cinétique à celle d'énergie potentielle. Le phénomène de résonance se traduit donc toujours par des oscillations importantes d'au moins une tension en un point du réseau, point nécessairement situé entre une inductance et une capacité.

Il existe dans les réseaux des sources autres que les générateurs 50 Hz, capables d'exciter des phénomènes de résonance. Ce sont d'abord les sources de tension et de courants harmoniques, c'est-à-dire les circuits magnétiques même faiblement saturés (groupes générateurs, transformateurs, moteurs, appareils redresseurs).

Pour pouvoir porter un jugement éclairé sur les risques de ferrorésonance et pour prendre les bons moyens correctifs qui s'imposent, il est impératif d'avoir une compréhension globale du phénomène de ferrorésonance. Une distinction entre résonance et ferrorésonance nous permet de mettre en évidence les caractéristiques particulières du phénomène de ferrorésonance.

Classiquement, en électrotechnique, on considère que les caractéristiques électriques des composants sont linéaires et, alors, le régime permanent atteint est unique et indépendant des conditions initiales. Des outils d'analyse numérique adaptés permettent de prévoir et d'expertiser les possibilités de ferrorésonance dans un réseau pour l'ensemble des valeurs possibles des paramètres de ce réseau en condition d'exploitation normale ou dégradée. Alors, les méthodes de calcul, basées sur l'approximation linéaire utilisée habituellement par les électriciens, ne permettent pas d'analyser ou de prédire un comportement ferrorésonant dans un circuit.

Les progrès récents dans le domaine des mathématiques et de l'analyse numérique nous permettent maintenant de disposer du cadre mathématique et des outils numériques adaptés à son étude, ces outils nous conduisent à mieux comprendre et d'étudier plus finement le phénomène de ferrorésonance.

I. Résonance et Ferro résonance :

I.1. Résonance :

La présence d'éléments inductifs L, capacitifs C et résistifs R, raccordés, soit en série, soit en parallèle, donne lieu à des répartitions de courants et de tensions dont les valeurs peuvent être dangereuses pour le matériel.

I.1.1. Résonance série :

La figure (I.1) représente un circuit RLC série aux bornes duquel on applique une tension ES.

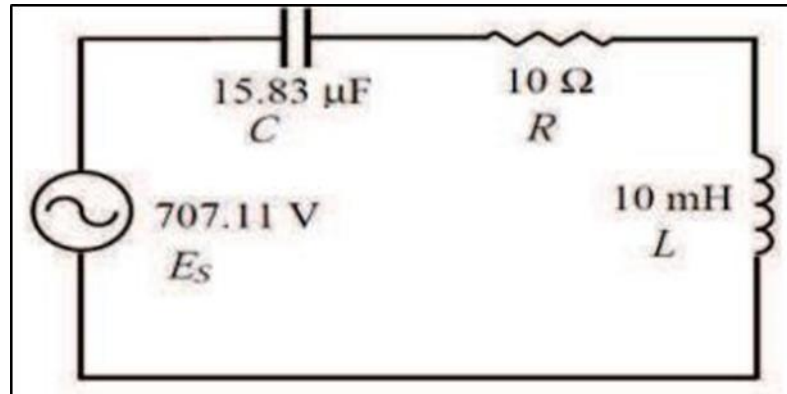


Figure 1.1 : Circuit linéaire résonant.

Le diagramme vectoriel de la figure (1.2) montre que pour certaines valeurs de L et C, les tensions aux bornes de l'inductance et de la capacité peuvent être supérieures à la tension ES du réseau. La tension ES est la somme vectorielle des tensions aux bornes de chaque élément :

$$E_s = RI + j\omega LI + \frac{1}{j\omega C}I \quad (I.1)$$

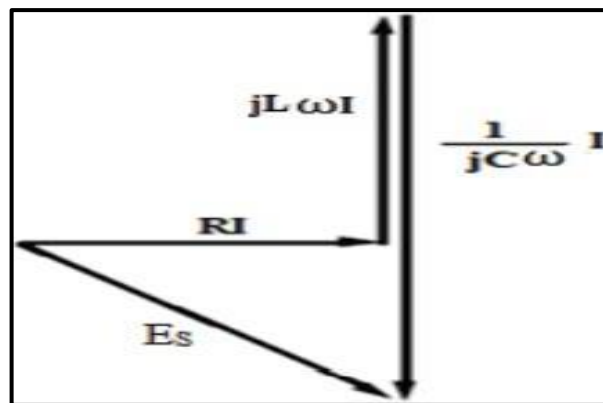


Figure I.2 : Représentation de Fresnel d'un circuit RLC série alimenté par une tension ES.

La résonance :

$$jL\omega = \frac{1}{jC\omega} \quad (I.2)$$

Es : l'inductance et la capacité en série se comportent comme un court-circuit.

Pour L et C données, la pulsation ωr telle que :

$$LCm^2r = 1 \quad (I.3)$$

ω : pulsation de résonance. La fréquence de résonance est donnée par :

$$Fr = \frac{1}{2\sqrt{LC}} \quad (I.4)$$

Les tensions apparaissant aux bornes de l'inducteur, et le condensateur, dans ces conditions peuvent atteindre plusieurs fois la tension de source. Le schéma de la figure (I.3) montre les caractéristiques de la tension aux bornes du condensateur, de l'inductance et le courant de charge quand la fréquence varie de 20 Hertz jusqu'à 600 Hertz. À la résonance, le graphe montre que la tension aux bornes l'inductance et le condensateur atteint des valeurs maximales quand la fréquence normale du circuit est accordée à environ 400 Hertz. Cette condition suggère également que les V_L et V_C excèdent la tension de la source. En outre, le courant dans le circuit est à son maximum parce que l'impédance du circuit est minimum, pure résistive. [2]

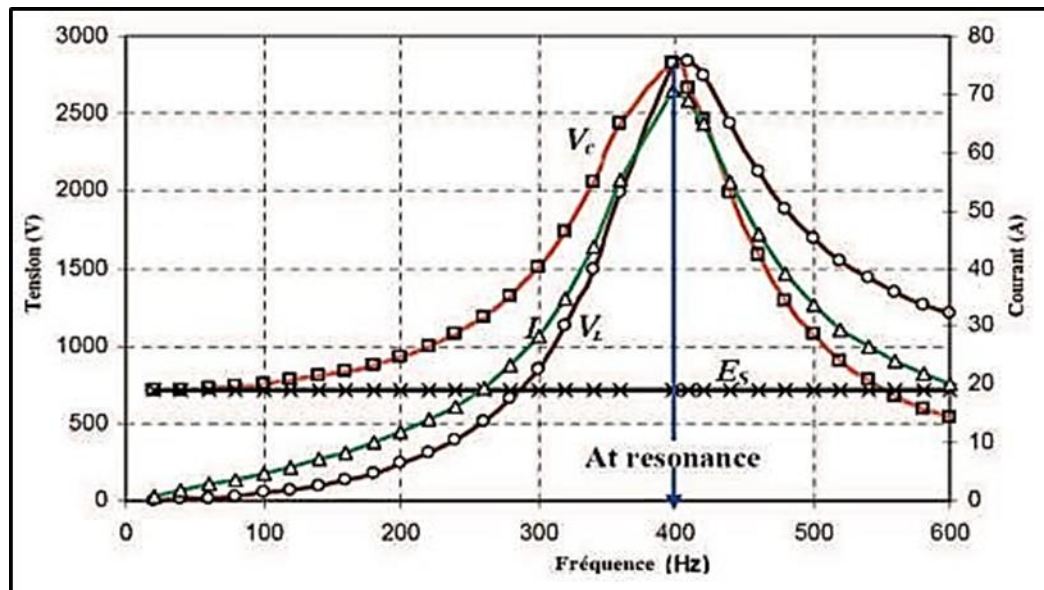


Figure I.3 : Caractéristique de V_c , V_L , I et E_s en résonance.

On définit alors un facteur de surtension f qui est le rapport de la tension U_L (ou U_C) à la tension d'alimentation E_S : [3]

$$F = \frac{LmrI}{RI} = \frac{L\omega r}{R} = \frac{1}{RCmr} \quad (I.5)$$

Le circuit linéaire du schéma de la figure (I.3) une fois soumis aux conditions de résonance,

produit une réponse prévue et de même forme que la tension de source. Des tensions sinusoïdales apparaissent sur tous les points du le circuit sans aucune déformation figure (I.4).

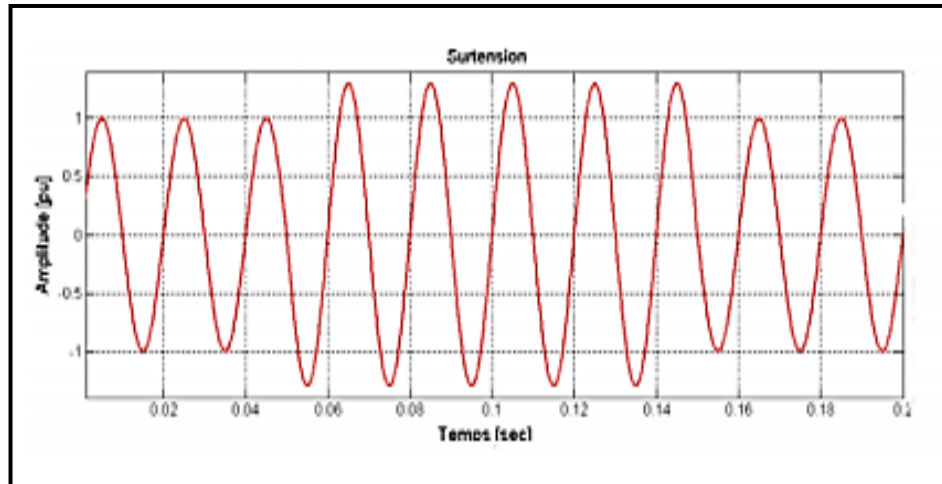


Figure I.4 : Exemple de la forme de la surtension de résonance (pas de distorsion).

I.1.2. Résonance parallèle :

La figure (I.5) représente un circuit R, L, C parallèle aux bornes duquel on applique une source de courant J.

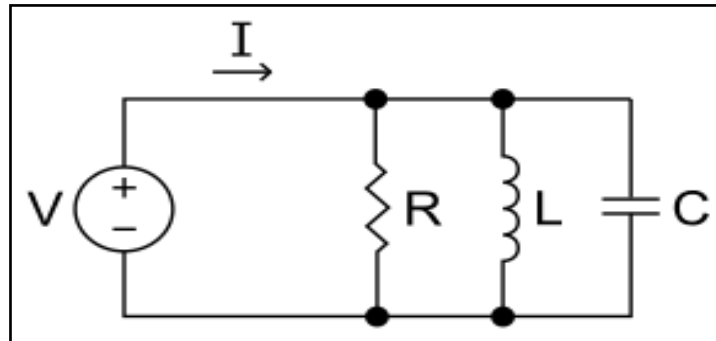


Figure I.5 : circuit R, L, C parallèle alimenté par une source de courant J.

La tension U est commune aux trois éléments. On a la relation suivante :

$$j = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{jL\omega} + iC\omega \right) U \quad (\text{I.6})$$

Le phénomène de résonance apparaît lorsqu' $IL = -IC$:

$$\frac{U}{jL\omega} = -C\omega U, LC\omega^2 = 1 \quad (\text{I.7})$$

On a alors $U = R J$; l'inductance et la capacité montés en parallèle se comportent comme un circuit ouvert, appelé circuit bouchon.

Pour L et C données, la pulsation ωr telle que $LC\omega r^2 = 1$ st appelée pulsation de résonance. On définit alors le facteur de surtension qui est le rapport entre la tension qui apparaît aux bornes du circuit R, L, C parallèle à la résonance, et la tension qui apparaîtrait à la résonance si l'inductance (ou la capacité) était le seul élément du circuit.

$$f = \frac{RJ}{L\omega r}, \quad f = \frac{R}{L\omega r} = RC\omega r \quad (\text{I.8})$$

I.2. Ferro résonance :

I.2.1 Ferro résonance série :

En revanche, les choses ne sont pas tout à fait les mêmes dans un circuit non-linéaire série, comme ce qui s'est produit la résonance dans le circuit linéaire série. L'inductance linéaire du schéma de la figure (I.1) est remplacée par une inductance non-linéaire (à noyau de fer saturable). Le circuit série se compose d'une source alternative V (ou ES pour le schéma de la figure (I.7)), une résistance R, un condensateur C et une inductance non-linéaire Lm comme représenté sur le schéma de la figure (I.6). [2]

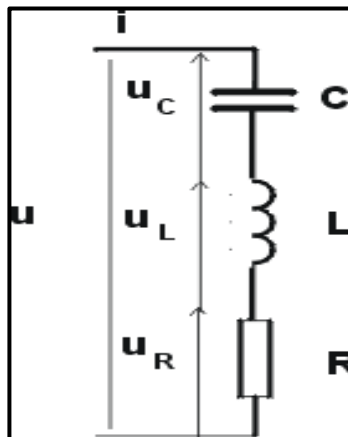


Figure I.6 : Circuit ferrorésonant série.

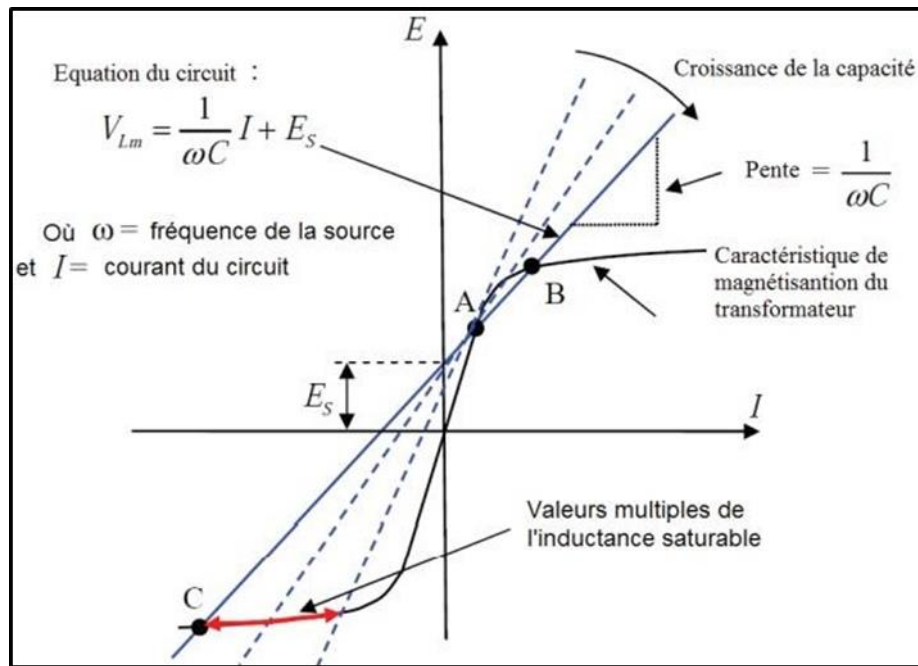


Figure I.7 : Caractéristique E-I (ou V-I) du circuit de ferrorésonance.

Dans le circuit linéaire, la résonance se produit seulement à une fréquence avec une seule valeur de L et C. D'autre part, le circuit non-linéaire peut présenter des valeurs multiples de l'inductance, en raison de la saturation du noyau de fer, donc ceci implique qu'il y a plusieurs valeurs de la capacité, qui peuvent potentiellement mener à la Ferro résonance à une fréquence donnée, qui sont représenté sur le schéma de la figure (I.7). [2]

Comme pour le circuit parallèle, cette équation peut être résolue graphiquement en fonction de i, en traçant les courbes figure (I.8) :

$$V = \sqrt{V^2 - R^2 I^2} \quad (\text{I.9})$$

$$\text{Et } V = V_L - \frac{i}{C\omega} \quad (\text{I.10})$$

La courbe $V_L(I)$ présente une pente très faible lorsque I augmente en raison de la saturation du noyau de fer de la bobine : $V_L(I) = L(I) \times \omega \times V$.

A la saturation, $L(I)$ devient très faible, la tension augmente presque plus lorsque I croît. Le point de fonctionnement du réseau est situé à l'intersection de la courbe (b) d'équation et l'ellipse (a) d'équation : I.10

Il existe trois points de fonctionnement possibles : M, N, P. M et P sont stables, N est instable. Une perturbation de tension peut faire passer le circuit du point M au point P. Il en résulte

un courant important et des surtensions importantes aux bornes de l'inductance et du condensateur. La ferrorésonance peut être évitée si la résistance R est suffisamment élevée pour que l'ellipse (a) reste à l'intérieur de la zone OSA, même lors d'une surtension élevée. [2]

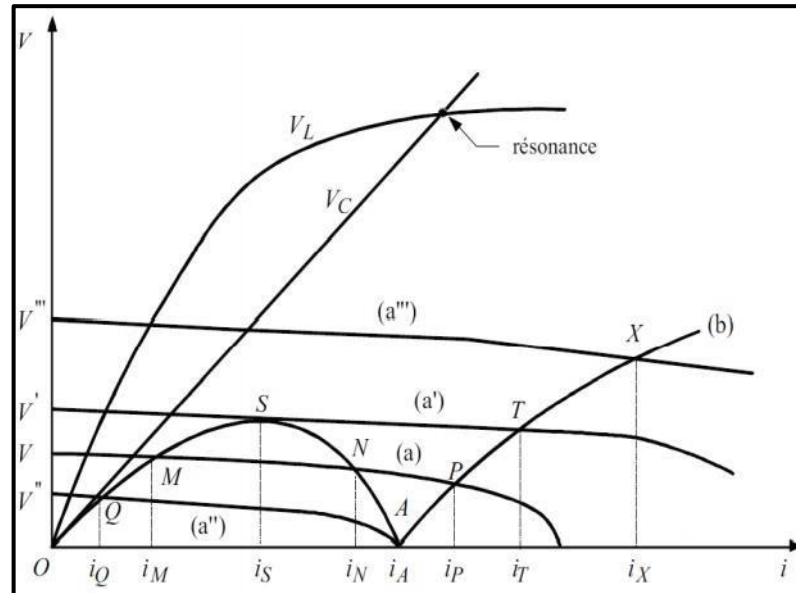


Figure I.8 : Ferrorésonance série - résolution graphique.

I.2.2 Ferro résonance parallèle :

Soit un circuit constitué par un condensateur, une bobine d'induction à noyau de fer saturable et une résistance en parallèle. Soit R la résistance, C la capacité, L l'inductance propre variable avec le courant traversant la bobine et la tension aux bornes du circuit.

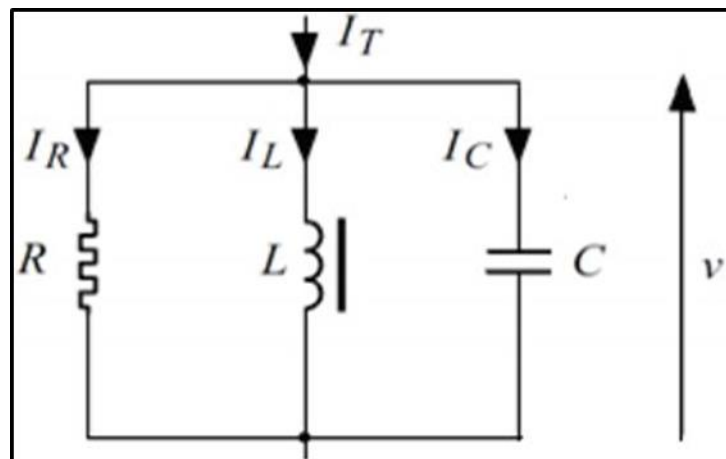


Figure I.9 : Circuit Ferro résonant parallèle.

Le courant total I_T traversant le circuit est alors donné par la relation :

$$I_t = \frac{V}{R} + j (C\omega V - IL) \quad (\text{I.11})$$

On ne peut pas exprimer IL en fonction de V , en raison de la non-linéarité de L .

Les valeurs efficaces sont données par la relation :

$$It^2 = \frac{V^2}{R^2} + j (C\omega V - IL)^2 \quad (\text{I.12})$$

$$\sqrt{It^2 - \frac{V^2}{R^2}} = |C\omega V - I_L| \quad (\text{I.13})$$

On peut alors écrire la relation :

Cette équation peut être résolue graphiquement en traçant, en fonction de V , les courbes représentatives des fonctions figure (I.9) :

$$I = \sqrt{It^2 - \frac{V^2}{R^2}} \quad (\text{I.14})$$

$$I = C\omega V - I_L \quad (\text{I.15})$$

L'intersection des courbes (a) et (b) donne, pour toute valeur de IT , les solutions en V de l'équation ; la figure (1.10) montre la résolution graphique de cette équation.

La courbe (a) est une ellipse d'équation :

$$\frac{V^2}{R^2} I^2 = IT^2 \quad (\text{I.16})$$

Dont un des demi- axes est égal à IT et l'autre à $R IT$. A chaque valeur du courant total IT correspond une ellipse.

La courbe $IL(V)$ présente une pente très importante lorsque V augmente en raison de la saturation du noyau de fer de la bobine :

$$I_{L(V)} = \frac{V}{L(V)m} \quad (\text{I.17})$$

$$Fr = \frac{1}{2\sqrt{LC}} \quad (\text{I.18})$$

A la saturation, $L(V)$ devient très faible, le courant augmente alors fortement figure (I.10). La courbe $I_C = C\omega V$ est une fonction linéaire de V .

La courbe (b) représente l'évolution de $I_C - I_L = (C\omega V - I_L)$ en fonction de la tension.

La portion OSA de la courbe (b) correspond à un courant en avance par rapport à la tension,

En raison de la prépondérance du courant capacitif. Au contraire, la partie AB correspond à un courant en retard, le courant inductif étant prépondérant. L'intersection de l'ellipse (a) et de la courbe (b) peut donner:

- Un point de fonctionnement Q si l'ellipse (a) est à l'intérieur de l'ellipse (a'') passant par le point A.
- 3 points de fonctionnement M, N, P si l'ellipse (a) est comprise entre les ellipses (a') et (a'').
- Deux points S, T si l'ellipse (a) est confondue avec l'ellipse (a').
- Un seul point X si l'ellipse (a) est extérieure à l'ellipse (a').

I.3. Mécanisme de ferorésonance :

Le circuit étant initialement au repos, le courant total I_T est nul, ainsi que la tension V , l'ellipse (a) se réduit au point O. Si le courant croît, la longueur des axes de l'ellipse (a) augmente et la tension s'élève, le point de fonctionnement M du régime se déplace sur la branche OS de la courbe (b). Lorsque le courant total dépasse la valeur I_T' pour laquelle l'ellipse (a') coupe la courbe (b) en S, le point de fonctionnement saute brusquement du point M au point T situé sur la branche AB de la courbe (b), puis il se déplace sur cette branche. La tension augmente donc brusquement, passant de V_S à V_T , puis elle continue à croître si le courant I_T augmente. Si maintenant le courant total décroît, le point B se déplace sur la branche AB et y demeure, même si le courant retombe au-dessous de la valeur I_T' correspondant à l'ellipse (a'). Lorsque le courant atteint la valeur I_T , le point de fonctionnement est P au lieu de M.

Celui-ci ne revient sur la branche OS que si le courant tombe au-dessous de la valeur I_T'' correspondant à l'ellipse (a'') passant par le point A. A ce moment, le point B saute brusquement de A à Q, et la tension de V_A à V_Q . On voit donc qu'à une même valeur efficace du courant I_T , peuvent correspondre deux régimes stables, pour lesquels la tension aux bornes du circuit prend des valeurs très différentes, V_M et V_P par exemple. En définitive, si le régime initial correspond à une tension faible (branche OS), avec un courant résultant capacitif, il peut arriver que, par suite d'un brusque changement de régime entraînant un phénomène transitoire (surintensité ou surtension), le courant résultant devienne inductif et que la tension conserve une valeur importante,

même lorsque la perturbation a disparu. La ferorrésonance est évitée si la résistance R est suffisamment faible pour que l'ellipse (a) reste à l'intérieur de la zone OSA, même lors d'une surintensité élevée. [3]

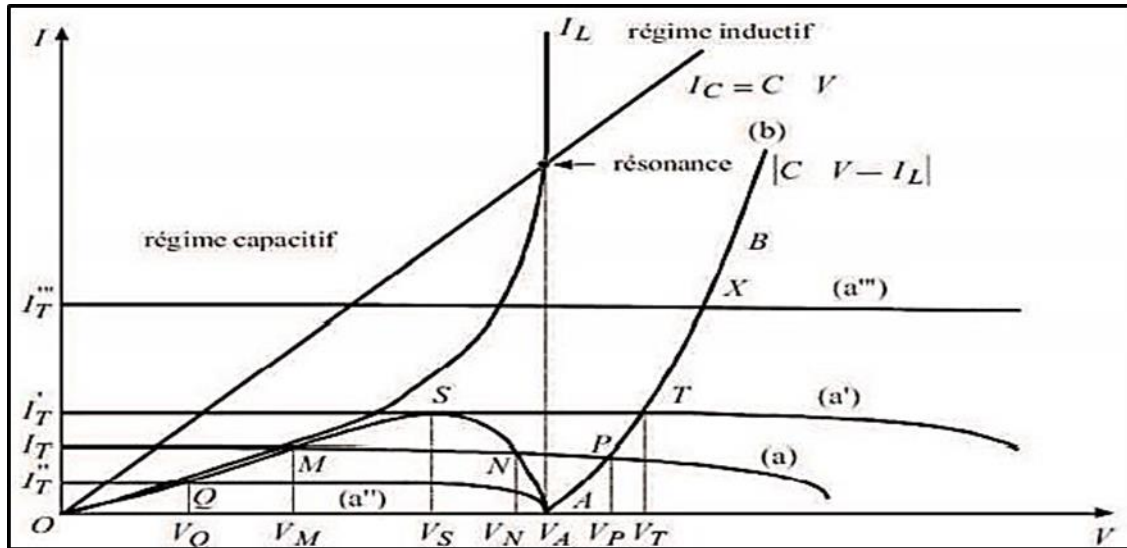


Figure I.10 : Ferro résonance parallèle - résolution graphique.

La propriété essentielle et caractéristique du phénomène de la ferorrésonance est de présenter au moins deux régimes stables pour une même excitation, la présence d'inductances aux caractéristiques non linéaires peut conduire à des comportements radicalement différents. Plusieurs régimes permanents différents peuvent apparaître dans un circuit donné. Ces régimes sont généralement anormaux et même dangereux pour le matériel électrique, car ils présentent des surtensions ou des surintensités. [3]

I.4 Différence entre la ferorrésonance et la résonance :

Les différences fondamentales d'un circuit ferorrésonant par rapport à un circuit résonant linéaire sont, pour ω donnée :

- ✓ La possibilité qu'il ait de résonner dans une large plage des paramètres.
- ✓ La fréquence des ondes de tensions et de courants qui peut être différente de celle de la source de tension sinusoïdale.
- ✓ L'existence de plusieurs régimes permanents stables pour une configuration et des valeurs de paramètres données. Un de ces régimes est le régime « normal » attendu (dans l'hypothèse linéaire), les autres régimes « anormaux » inattendus sont souvent dangereux pour le matériel.
- ✓ Le régime effectivement atteint dépend des conditions initiales (charges électriques des

condensateurs, flux rémanent du matériau constituant le circuit magnétique des transformateurs, instant d'enclenchement). [4]

I.5 Conditions et interprétation physique de la ferrorésonance :

D'après cette définition de la ferrorésonance quatre conditions sont nécessaires pour l'existence de ce phénomène dans un circuit :

- Le circuit doit être excité par une ou plusieurs sources de tensions (habituellement sinusoïdales)
- Il doit y avoir un ou plusieurs éléments non linéaires constitués d'un matériau ferromagnétique saturable comme les inductances ou les transformateurs
- Il doit y avoir un ou plusieurs condensateurs pour échanger de l'énergie avec l'élément non linéaire
- Les pertes doivent être faibles. [5]

I.6 Exemple simple de Ferro résonance dans un transformateur monophasé :

Considérons le circuit de la figure (I.11), comprenant l'enroulement primaire d'un transformateur alimenté par une source de tension sinusoïdale de valeur efficace E par l'intermédiaire d'un circuit RC, exemple bien connu de la ferrorésonance série en monophasé. La courbe de saturation du transformateur, en coordonnées V, I , (V et I en valeurs efficaces), est donnée par la figure (I.12).

On note que la courbe de saturation est constituée de trois branches caractéristiques :

❖ Une branche OA sensiblement rectiligne où la loi de variation de $V(I)$ est pratiquement linéaire ; ici, le transformateur n'est pas saturé, il se comporte comme une inductance constante égale à sa valeur à l'origine $L = L_0$; la relation $V(I)$ s'écrit : $V = L_0 \omega I$ avec ω la pulsation de la source.

❖ Une deuxième branche BC sensiblement rectiligne où le transformateur est très saturé ; dans cette zone, tout se passe comme si le fer se comportait comme l'air (la perméabilité relative μ_r tend vers l'unité), le transformateur est de nouveau équivalent à une inductance constante $L = L_s$; la loi de variation de $V(I)$ est pratiquement :

$$V = V_0 + L_s \omega I \quad (\text{I.19})$$

❖ Une troisième branche AB intermédiaire appelée coude de saturation où la relation $V(I)$ n'est pas linéaire ; en particulier, on ne peut plus définir une inductance constante équivalente au transformateur.

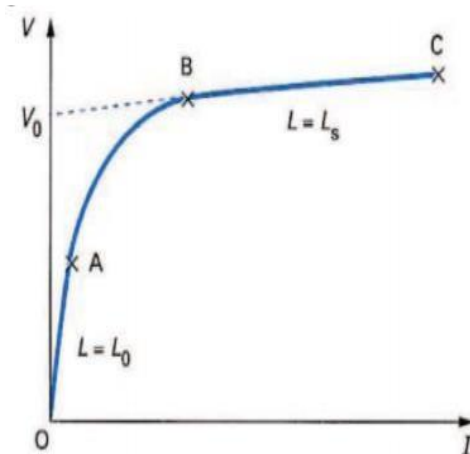


Figure I.11 : Circuit ferrorésonant série simple. Dans le plan tension efficace-courant efficace en Négligeant les harmoniques.

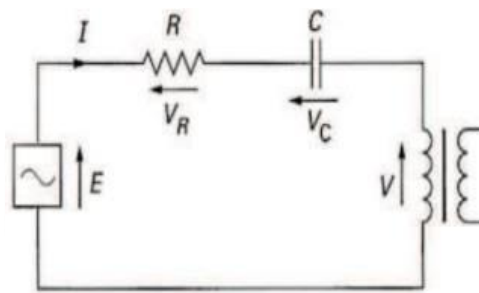


Figure I.12 : Courbe de saturation d'un transformateur

I.7 Classification des régimes Ferro résonants :

L'expérience des formes d'onde apparaissant sur les réseaux, des expérimentations sur modèles réduits de réseaux ainsi que des simulations numériques permettent de classifier les régimes de ferrorésonance en quatre types distincts.

Cette classification correspond au régime permanent, c'est à dire après extinction du régime transitoire.

Il est en effet difficile pour un circuit ferrorésonant de distinguer le régime transitoire normal des régimes

Transitoires Ferro résonants. Ceci ne signifie en aucun cas que les phénomènes de ferrorésonance transitoire ne peuvent pas être dangereux pour le matériel électrique.

Des surtensions transitoires dangereuses peuvent par exemple apparaître plusieurs périodes du réseau après un événement (par exemple à la suite d'un enclenchement d'un transformateur à

vide) et persister pendant plusieurs périodes du réseau.

Les quatre types de ferrorésonance que l'on rencontre sont :

- Régime fondamental,
- Régime sous-harmonique,
- Régime quasi-périodique,
- Régime chaotique.

On peut reconnaître le type de ferrorésonance :

- ❖ Soit par le spectre des signaux courants et tensions
- ❖ V soit par une image stroboscopique obtenue en mesurant le courant i et la tension v en un endroit donné du réseau et en traçant dans le plan v, i les valeurs instantanées à des instants séparés par une période du réseau.
- ❖ Les caractéristiques de chacun de ces types de Ferro résonance sont précisées ci-dessous.

Conclusion :

Ce chapitre qui concernait les phénomènes de résonances électriques avec la présence ou pas des pièces ferromagnétiques. Ces phénomènes peuvent être très nuisibles s'ils se manifestent soudainement sans volonté derrière (ex, perturbation dans les réseaux électriques provoquant des

surintensités ou surtensions) et peuvent être très bénéfiques si on veut accroître les puissances via ces phénomènes.

L'un des exemples de dispositif utilisant ce genre de phénomène est le transfert d'énergie sans contact qui sera traité dans la suite.

Chapitre II :

*Le transfert d'énergie sans
contact et ses applications*

Introduction :

Le transfert d'énergie sans contact est maintenant une technique éprouvée qui présente des avantages indéniables de sécurité (absence de contact électriques directs) et d'ergonomie. Le mode de transfert d'énergie par induction magnétique trouve des applications dans de nombreux domaines, allant de l'électronique mobile (recharge de smartphones, ordinateurs portables, GPS...), au secteur des transports (voitures, bus...), en passant par les implants actifs en médecine (stimulateurs cardiaques, défibrillateurs, prothèses auditives). Dans ces types d'applications, l'énergie électrique transmise va servir à charger une batterie. Ce mode de transfert par couplage magnétique concerne également le domaine très étendu des systèmes de chauffage par induction.

II.1 L'état de l'art :

Au début du 20^{ème} siècle, Nikola Tesla avait déjà effectué une transmission d'électricité sans fil. Il utilisait alors l'induction électromagnétique. Il avait découvert que l'électricité pouvait être transmise à travers l'air mais aussi la terre. Au cours de ses recherches, il avait réussi à allumer des lampes à une distance moyenne.

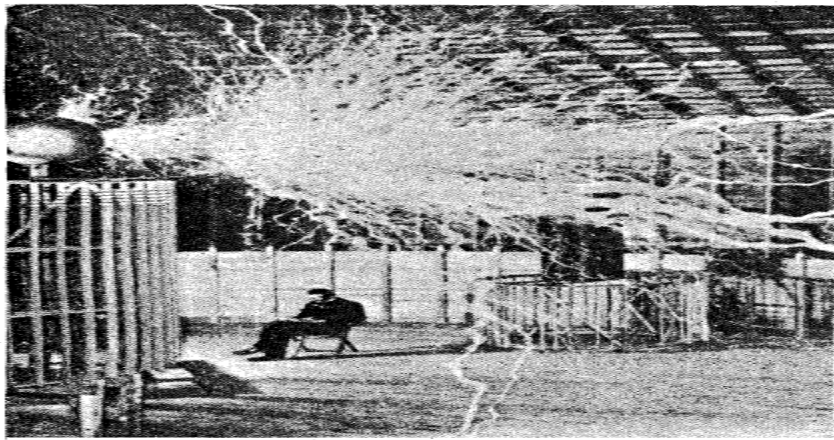


Figure. II.1 : Transmission d'énergie par ondes radio - Nikola Tesla dans son Laboratoire de Colorado Springs

En 1969, Peter Glaser présente le concept de SPS (Solar Power System). Ce projet pourrait présenter une alternative aux problèmes énergétiques que connaît la planète, mais aussi comme

source d'énergie propre et écologique. Le système issu de ce projet comporte un satellite en orbite géostationnaire qui capte l'énergie solaire, cette énergie solaire est convertie en énergie microonde et envoyée sur terre.

En 1975, l'expérimentation terrestre de Goldstone menée par Raytheon représente un tournant historique dans le domaine de la TESH. Elle a contribué de manière considérable à la validation du concept et à la crédibilité du projet SPS. Avec un système pilote, une puissance continue de 30 KW a été récupérée et un rendement global de 54% a été mesuré et certifié. La distance entre les antennes d'émission et de réception est de 1.6 Km [6].

A partir de 1994, le laboratoire d'Electronique, d'Energétique et des Procédés de l'université de la Réunion (France), en collaboration avec l'équipe japonaise de l'ISAS, s'est lancé dans un projet d'envergure qui consistait à étudier la faisabilité d'un transport d'énergie sans fil pour alimenter l'île de Grand Bassin, région qui est fortement accidentée et difficilement accessible. La puissance d'émission était de 800 W sur une distance de 40 m. En réception, une rectenna composée de 2376 antennes dipôles réparties sur une surface de 11.76 m² a été utilisée pour collecter et convertir une partie de l'énergie RF émise. Trois lampes de 9 W furent allumées grâce au dispositif développé, ce dernier présentait un rendement global d'environ 5% [7].

II.2 Quelques exemples :[14]

II.2.1 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 [9]. Citons également des projets de recharge de bus pour des puissances respectivement 20 kW et 60 kW en Nouvelle Zélande et en Italie [10-11].



(a)

(b)

Figure. II.2 : Démonstrateur du Grand Bassin - Ile de la Réunion : a) Vue d'ensemble
b) Réseau de 2376 rectennas



Figure.II.3: Waseda Electric Bus, source [9]

La société Bombardier propose également une solution de recharge aux arrêts pour le bus Primove au travers d'un système sans contact. La puissance de charge est de 200 kW [9]. La Figure (II.3) montre une partie du récepteur (sous le véhicule) qui s'abaisse pour se rapprocher de l'émetteur au sol.

En matière de recharge statique d'automobiles, le système The Magne-Charge, développé par la société Delco Electronics filiale de Général Motors, fut l'un des premiers systèmes de recharge inductive statique équipant entre autres le Toyota RAV4. Ce chargeur permet de transférer jusqu'à 6,6 kW [8].

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 [11].

La société Witricity développe un système de recharge sans contact pour les véhicules électriques visible sur la Figure (II.4). Le système propose plusieurs puissances de transfert i.e. 3,6, 7,7 et 11 kW avec un rendement atteignant 94% pour différentes distances bobine émettrice - bobine réceptrice [12].



Figure II.4 : Système WPT de Witricity, source [12]

La société Evatran a aussi développé son système de recharge sans contact (Plugless Power) pour un transfert de 3,3 kW pour une distance entre bobines de 100 mm. Le système est réalisé pour équiper la Tesla model S ainsi que la BMW i3 [13].

II.2.2 Recharge dynamique

Nous appellerons ce type de recharge DWPT pour Dynamic Wireless Power Transfer. Dans ce type de recharge, le véhicule se charge en roulant Figure (II.5). Cela se fait à partir d'une voie spécialement équipée où sont disposées des bobines qui ne s'activent que lors du passage du véhicule, nous parlerons alors de route électrique. Cette solution offre la possibilité de réduire la capacité des batteries embarquées dans le véhicule, et donc de réduire son poids et son prix.

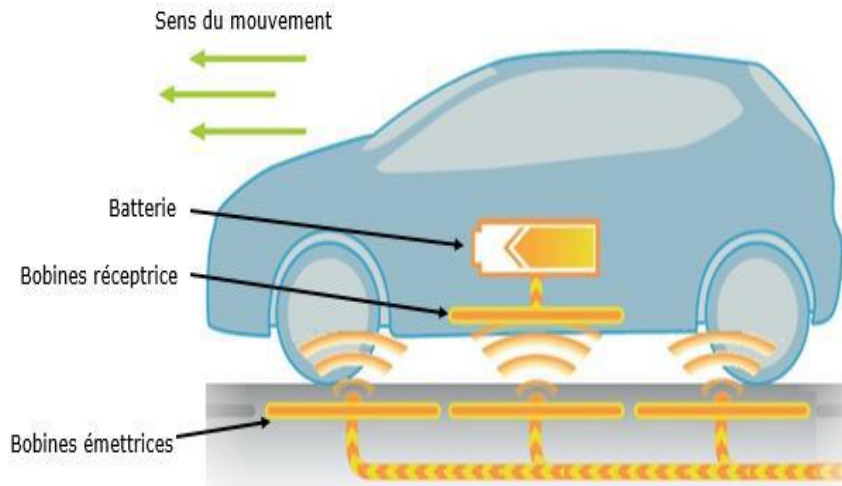


Figure II.5 : Recharge par induction dynamique d'un véhicule électrique

Il existe deux solutions techniques pour la recharge inductive dynamique. La différence provient de la forme des bobines côté de piste. Les pistes peuvent être soit à émetteur segmenté, soit à émetteur unique Figure (II.6).

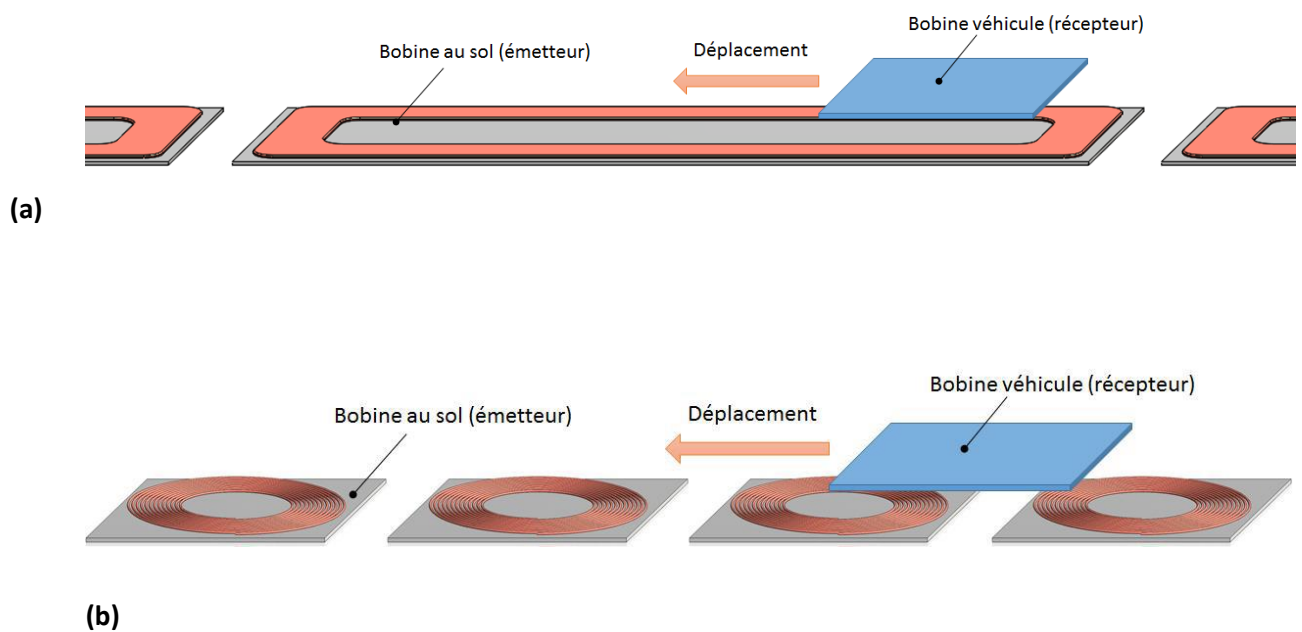


Figure II.6 : Différents types de pistes, (a) piste à émetteur unique, (b) piste à émetteur segmenté

Pour les systèmes à émetteur unique Figure (II.6a) la bobine réceptrice est de taille réduite par rapport à la bobine émettrice qui est de forme allongée dans la direction de déplacement du véhicule. Ce type de piste permet d'avoir un couplage relativement constant tout au long de l'émetteur. Néanmoins, le rayonnement sur toute la longueur de l'émetteur alimenté pose des

Problèmes vis-à-vis des risques d'exposition aux champs électromagnétiques et des limites imposées par les normes. De plus, bien que quasi constant, le coefficient de couplage magnétique entre l'émetteur et le récepteur est relativement faible ce qui est problématique en matière d'efficacité énergétique du transfert d'énergie comme nous le verrons plus loin.

Pour les pistes segmentées, il n'y a pas de différence de taille remarquable entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice Figure (II.6b). Ce type de piste nécessite de connaître la position du véhicule en temps réel afin d'alimenter au fur et à mesure les bobines sous le véhicule. Ce système permet de réduire significativement les rayonnements électromagnétiques parasites à proximité de la piste.

II.3 Les vecteurs de transfert d'énergie sans contact :

Le transfert d'énergie sans contact est généralement appelé par les anglo-saxons Wireless Power Transfer (WPT), Contact less Energy Transfer (CET) ou encore Contact less Power Transfer (CPT). Ces termes font référence au principe général mais pas à la technologie vecteur d'énergie. On trouve toutefois beaucoup d'abus de langage, la terminologie la plus courante, WPT, pouvant faire référence à la technologie par induction en particulier.

Les techniques employées pour transférer de l'énergie à distance sont de nature variée; des débuts de Nikola Tesla dans les années 1900, avec le principe des bobines de Tesla [15], [16], permettant de transmettre de l'énergie sur de longues distances en utilisant l'atmosphère terrestre comme conducteur électrique, à la transmission d'énergie par laser très directionnelle, le choix du bon vecteur de transfert d'énergie est la première étape essentielle de notre projet.

Le principe physique en jeu est généralement basé sur le rayonnement électromagnétique, bien que l'on recense également une solution basée sur les ondes mécaniques [17]. On ne dénombre pas moins de quatre technologies différentes, à des stades de développement plus ou moins avancés et qui dépendent principalement de la longueur d'onde utilisée pour transmettre l'énergie. On retrouve ainsi des vecteurs de transmission tel que le laser, le champ électromagnétique ainsi que les ondes acoustiques. Le transfert par champ électromagnétique peut se faire en exploitant principalement le vecteur champ magnétique ou le vecteur champ électrique.

Vecteurs	Fréquence	Puissance transmissible	Distance	Rendement (%)	Exemples d'applications
Acoustique	20 kHz-100 kHz	0.01-1000 W	0.2-1 mm	1 – 80	Biomédical
			1-300 mm		Capteur pour le nucléaire spatial
Laser	10 ¹² Hz	1-100 W	du m au km	20 – 30	spatial
	700-1400 nm				Biomédical
Inductif (magnétique)	20 kHz – 10 Mhz	1 W – 200 kW	0.2 mm – 2 m	≥ 80 – 90	Chargeurs batteries pour VE et appareils mobiles
					Actionneurs
Capacitif (électrique)	100 kHz – 10 Mhz	1 – 50 W	0.1 – 0.5 mm	50 – 80	Téléphonie mobile
					Capteurs

Tableau II.1: Vecteurs de transfert d'énergie sans contact [17].

La transmission d'énergie par ondes acoustiques à l'avantage d'être utilisable dans les milieux où les rayonnements électromagnétiques sont à proscrire. La transmission peut se faire à travers de parois métalliques, ce qui est adapté pour les capteurs dans les systèmes nucléaires, les chambres sous vide, etc. Les puissances en jeux ne correspondent cependant pas à ce que nous recherchons, de même pour le rendement qui décroît fortement avec la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Le laser pourrait être une solution, mais cela reviendrait à concentrer une grande énergie sur un petit faisceau très directif. Cela pose des problèmes évidents de sécurité dans le cadre d'une application à l'alimentation de véhicules électriques en roulant. De plus les puissances actuelles sont très faibles.

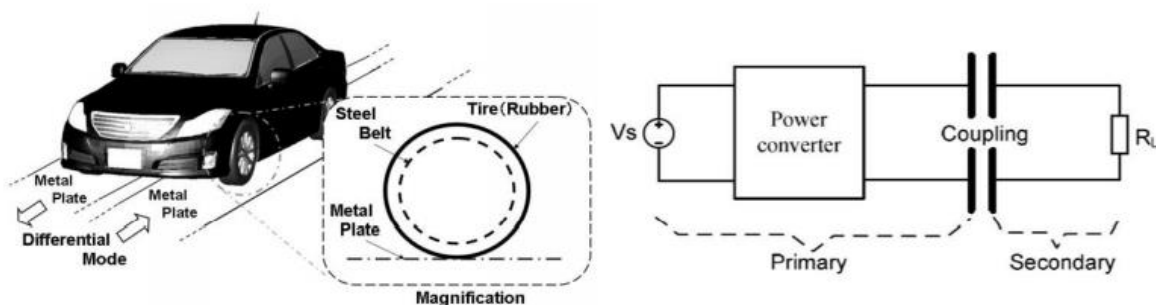


Figure II.7: principe du transfert d'énergie capacitif pour véhicules électriques en mouvement [18], [19].

Le transfert d'énergie sans contact par couplage capacitif, schématisé à la Figure (II.7), peut être envisagé pour alimenter un véhicule roulant. Des études ont été récemment conduites en ce sens, notamment par Toyota et l'université d'Auckland [18] – [20]. Cette solution présente l'avantage d'être moins sensible au décalage que la transmission par induction mais la mise en œuvre semble complexe et implique notamment de fortes tensions aux bornes des condensateurs de couplage. De plus, la distance entre armatures conduit à de faibles capacités et implique de fonctionner à des fréquences très élevées, supérieures au méga Hertz.

II.4 Principe de la transmission d'énergie sans fil :

Le principe d'un transformateur électrique est l'exemple le plus courant de transmission d'énergie sans fil. Le système est composé de deux bobines Figure (II.8), l'une émettrice « primaire » l'autre réceptrice « secondaire ». Ces bobines sont électriquement isolées l'une de l'autre. Le transfert d'énergie se fait par couplage magnétique.

Le circuit primaire est alimenté sous la tension alternative, le courant alternatif qui circule dans l'enroulement primaire « la bobine émettrice » génère un champ magnétique. Ce même champ va générer une tension aux bornes de la bobine réceptrice. Cette tension va pouvoir être utilisée pour alimenter une charge. Le rendement de la transmission de puissance dépend du coefficient de couplage (K) entre les deux bobines ainsi que de leurs coefficients de qualités (Q). Il dépend également de la forme des bobines ainsi que de l'angle qu'elles forment entre elles. [21]

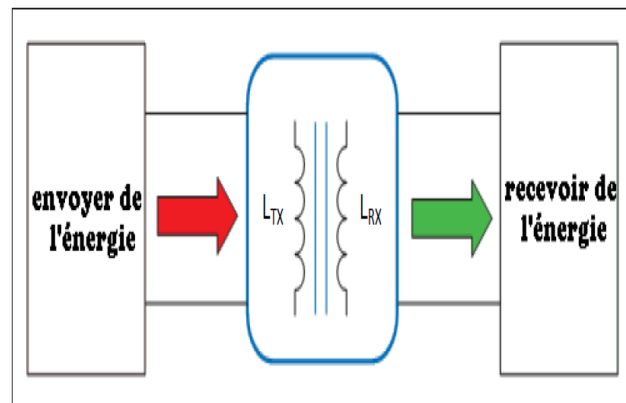


Figure II.8: principe du transfert d'énergie sans fil

II.5 Domaines d'application de la transmission d'énergie sans fil :

La transmission d'énergie sans fil est déjà fonctionnelle pour la recharge des brosses à dents électriques et des téléphones portables. Cependant d'autres utilisations de cette technologie commencent à voir le jour, dans différents domaines.

II.5.1 Domaine industriel :

L'industrie représente un véritable défi en ce qui concerne l'alimentation en électricité, que ce soit pour l'installation ou bien pour le rendement. En effet, on doit souvent avoir recours à des câblages dans des endroits éloignés. Elles ont tendance à créer des interconnexions électriques sans fil particulièrement pour la rotation et la mise en mouvement de robots, mais aussi pour les environnements où il est difficile de câbler, voire impossible, comme les mines. Également, assurer l'alimentation sans fil de capteurs et d'actionneurs. Ainsi, il n'est plus nécessaire d'installer des câblages coûteux ou de remplacer les piles. Les appareils mobiles pourront eux aussi bénéficier de la recharge sans fil (robots mobiles, véhicules autonomes, outils). [24]

II.5.2 Domaine du grand public :

La transmission d'énergie électrique sans fil permet la recharge des appareils du quotidien, quel que soit la demande en puissance et le nombre d'appareils à recharger. Elle projette en effet d'effectuer, d'une part, la recharge de l'électronique mobile (téléphones, ordinateurs portables, ...) sans fil, de manière automatique dans les maisons, les voitures, les bureaux, les points d'accès publics et aussi, permet l'alimentation sans fil de périphériques des ordinateurs de bureau (souris, claviers, imprimantes, écrans). [24]

Le constructeur chinois Haier™ a présenté au salon de l'IFA 2012 à Berlin, une télévision et un socle permettant d'échanger un flux vidéo de haute définition en trois dimensions ainsi que l'énergie nécessaire au fonctionnement du téléviseur. Ce produit utilise la norme Wireless Home Digital Interface pour l'échange du flux vidéo. [21]

Le constructeur Panasonic™ a présenté la même année au salon de Berlin une table à induction pour pouvoir cuisiner mais aussi pour alimenter sans fil un presse-agrume ou un mixeur Figure (II.9) [21]

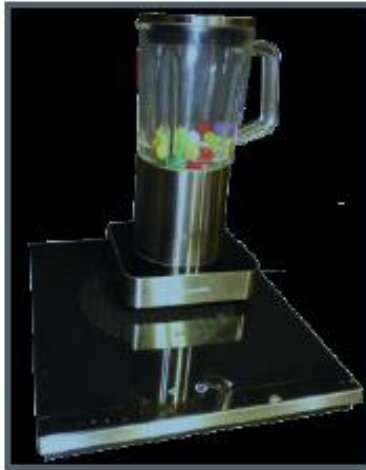


Figure II.9: Le mixeur sur la plaque à induction.

II.5.3 Domaine automobile :

La charge sans contact à l'arrêt présente l'avantage d'éviter toute manipulation de câble et d'être moins sensible que les chargeurs filaires. La voiture est équipée d'une première plaque posée au sol intègre une bobine primaire qui va émettre un champ magnétique alternatif à destination d'une deuxième plaque dotée d'une bobine secondaire installée sous le véhicule électrique ou hybride rechargeable Figure (II.10). Ce système fonctionne lorsque la voiture est stationnée au-dessus de la bobine primaire et que les deux plaques sont parfaitement alignées. Pratique, la charge sans fil permet de faire le plein d'une batterie en toute sécurité, qu'il pleuve ou qu'il neige. [22]

Par contre, cette même technologie pouvant alimenter un véhicule en roulant en change toutes ses caractéristiques. En considérant une infrastructure routière équipée de bobines émettrices, activées au passage d'un véhicule demandant à être alimenté, l'autonomie du véhicule devient limitée principalement par la taille de l'infrastructure équipée. [23]

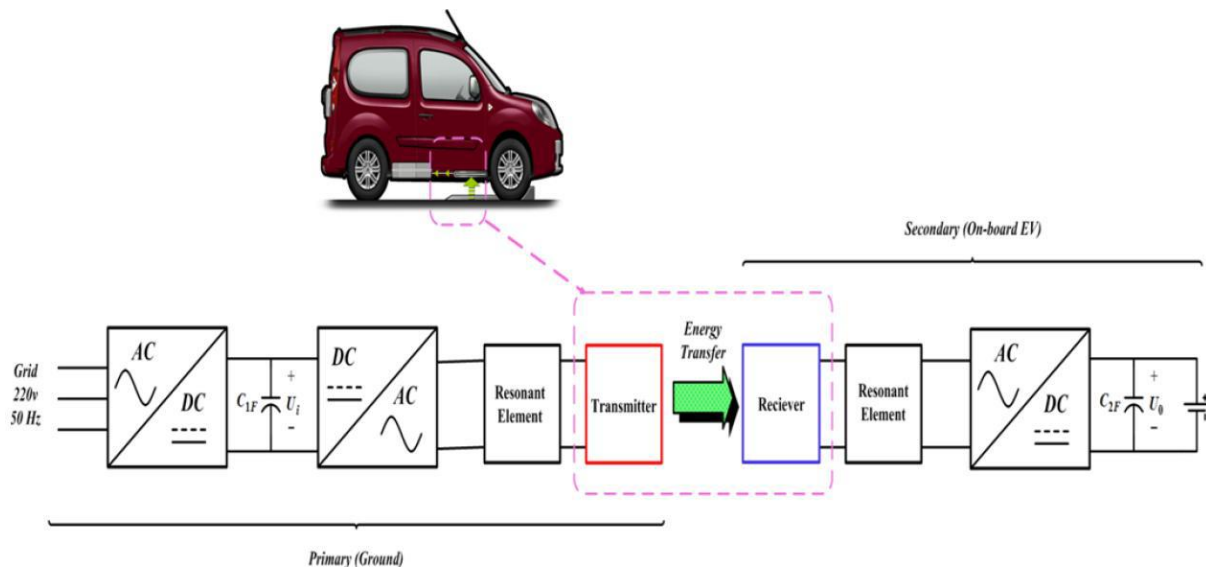


Figure II.10 : le principe de la recharge sans fil d'un véhicule électrique

Des essais d'adaptation de cette technologie à plus forte puissance est en développement pour recharger les voitures électriques et hybrides les rendant plus attrayantes.

Les véhicules électriques et hybrides présentent un grand intérêt écologique, mais la recharge repousse les consommateurs car il faut la faire plus ou moins souvent, à certains endroits seulement en dehors de la maison, et pas d'une manière très pratique. [24]

Nous pouvons citer la marque automobile Volvo™ et l'entreprise Flandres' Drive™ qui ont travaillé sur une Volvo C30 pour adapter un système de recharge sans contact intégré à la route et espère à terme pouvoir l'intégrer aux bus. [21]



Figure II.11 : Au premier plan la cellule de recharge, et en arrière-plan la voiture servant aux tests.

L'équipementier automobile Delphi™ et la société WiTricity™ ont développé un module de recharge sans fil, le WiT-3300. Il utilise la résonance magnétique aux alentours de 145kHz pour pouvoir transférer une puissance entre 300 et 3300 watts. [21]

Grace au kit de développement WIT-3300, le conducteur n'a plus besoin de brancher sa voiture à une source d'alimentation avec câbles Figure (II.12), la recharge est automatique à la maison, dans les garages de stationnement, dans les dépôts de la flotte, et dans les kiosques à distance.

Ce kit permet même la recharge d'appareils mobiles pendant la conduite, sans la nécessité de cordons d'alimentation. [25]

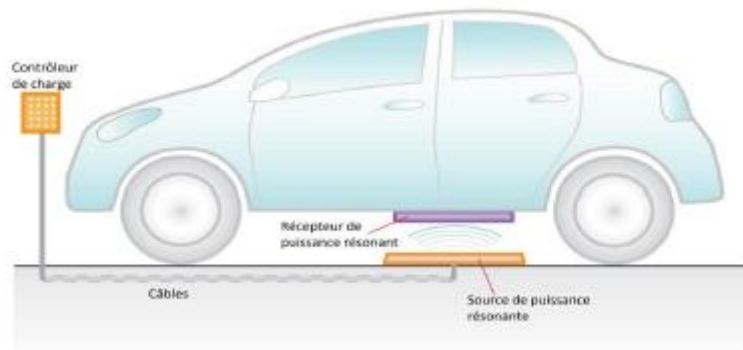


Figure II.12 : Représentation du système Wit-3300 sur une voiture.

Le géant Toyota s'est ainsi associé dès 2011 avec WiTricity pour le développement d'une technologie de recharge de voitures électriques, tandis que Renault™ et Qualcomm™ ont signé le 24 juillet 2012 un protocole d'accord sur la technologie de recharge sans fil de véhicule électrique, pour installer une cinquantaine de points de recharge dans des parkings de Londres (Angleterre). En 2012 une BMW électrique a montré qu'elle pouvait parcourir 225 km, entre le Massachusetts et le Connecticut, en ne s'arrêtant que trois fois sur des aires de rechargement sans fil de WiTricity.

La technologie intéresse aussi les bus Figure (II.13), dans les années 2010, l'institut des sciences et technologies de Corée (KAIST) a mis en service un bus alimenté sans contact en roulant (Un véhicule tout terrain et un train touristique ont également fait partie des expérimentations). Le système revendique un rendement dépassant les 80 % pour une puissance pouvant aller jusqu'à 75 kW, Seul le segment se trouvant sous le véhicule est alimenté, avec un courant pouvant aller jusqu'à 200 A à une fréquence de 20 kHz.

Ce type est actuellement en usage commercial dans le parc de Seoul depuis 2011, dans le campus du KAIST depuis 2012, et sur une flotte de bus de la ville de Gumi, en Corée, depuis 2013. [23]



Figure II.13 : bus électrique équipé de récepteur d'électricité sans fil

Un projet semblable est en cours d'élaboration à Braunschweig (Allemagne), les bus municipaux sont équipés de batterie et à chaque arrêt ils sont rechargés par une borne enterrée le temps que les passagers montent et descendent.

Suivant ce concept une « autoroute électrique » est à l'étude aux Pays-Bas afin de permettre aux voitures de se recharger en roulant. Ce qui donnerait un coup d'accélérateur à l'adoption des voitures électriques dont l'autonomie est encore trop souvent critiqué.

Les optimistes estiment que dans quelques années, nos voitures électriques se chargeront en roulant, tandis que notre téléphone posé sur le tableau de bord et la tablette du petit derrière se chargeront eux-aussi sans aucun contact.

En somme, le domaine de l'automobile est fortement intéressé par la transmission d'énergie sans fil, aussi bien pour que l'utilisateur recharge son téléphone portable en le plaçant simplement à l'endroit prévu, que pour la recharge de la voiture elle-même si elle est électrique ou hybride. Cette dernière utilité permettra certainement aux véhicules électriques d'être moins contraignant à recharger, à augmenter l'autonomie grâce à une recharge continue par le biais d'une route aménagée et donc être une réelle alternative face aux véhicules thermiques. [21]

II.6 Les exigences du transfert d'énergie sans contact vers un véhicule en mouvement :

La présentation des systèmes existants est un condensé des contraintes que l'on peut rencontrer pour alimenter un véhicule sans contact en roulant. Elles incluent celles de la transmission d'énergie à l'arrêt et celles plus spécifiques à l'alimentation en roulant. Nous rappellerons qu'à ce jour, aucun système ne satisfait l'ensemble des contraintes liées à la charge statique.

Nous cherchons ici à concevoir un système possédant les caractéristiques suivantes :

1) **Fonctionnement avec un entrefer important** : Équivalent ou supérieur à la garde au sol moyenne des véhicules de tourisme, de l'ordre de 15 à 25 cm en incluant l'enfouissement des bobines dans la route. Nous écartons d'emblée les systèmes mécaniques embarqués de réduction d'entrefer, qui impliquent un volume d'intégration important dans le soubassement du véhicule.

2) **Protection des passagers, piétons et du matériel** : Il est dans ce cas nécessaire de respecter les normes et recommandations en vigueur. De plus, il est indispensable de protéger le véhicule du rayonnement magnétique pour éviter sa détérioration et réduire les pertes par courant de Foucault dans les parties métalliques.

3) **Dynamique rapide de la transmission d'énergie** : Cette contrainte est spécifique à l'alimentation en roulant. Nous considérons pour ce critère le pire cas de fonctionnement, soit la vitesse légale maximale autorisée. De plus, si le système devait être constitué d'une multitude de bobines au sol afin de confiner le rayonnement magnétique dans une zone protégée sous le véhicule, la commutation de l'alimentation entre celles-ci devrait également être suffisamment rapide.

4) **Détection du véhicule et commutation automatique** : des équipements au sol. Il s'agit par exemple ici de détecter le véhicule à alimenter et de transmettre l'énergie avec la bonne bobine, au bon moment. Cette caractéristique est également spécifique à l'alimentation en roulant des VEs. L'objectif est notamment d'éviter d'avoir recours à des voies dédiées.

5) **Pas de communication entre le sol et le véhicule** : À des fins de régulation de puissance. Il est techniquement possible de mettre en œuvre une telle communication, mais sa réalisation, et sa fiabilité dans un environnement sévère, ainsi que le fonctionnement avec une multitude de véhicules et de bobines au sol sont une source de défaillance supplémentaire. Cela implique donc un contrôle de la puissance transmise et une mise en sécurité depuis le véhicule.

6) **Indépendance de la puissance transmise** : et de la tension reçue par rapport à la position du véhicule. C'est la tolérance au positionnement du transfert d'énergie : Un paramètre essentiel du transfert de l'énergie sans contact est le couplage entre la (ou les) bobine(s) émettrice(s) et la bobine réceptrice. Ce couplage n'est autre que l'image de la position relative de la bobine réceptrice par rapport à la bobine émettrice, variable principalement sur 2 axes pour une alimentation en roulant. Un système de guidage permet cependant de réduire les variations de position latérale.

7) **Interopérabilité** : L'interopérabilité désigne la capacité de deux systèmes différents, provenant par exemple de différents fabricants, à fonctionner ensemble. Cette interopérabilité peut être partielle, les performances du système global étant amoindries, ou totale. Elle désigne également un fonctionnement possible entre systèmes ayant une puissance nominale, une géométrie de bobine, une architecture électronique un mode de pilotage ou un système de communication différents. L'interopérabilité, qui nécessite toutefois une standardisation de certains paramètres, est en cours d'élaboration, notamment pour définir des « niveaux d'interopérabilité » de différents systèmes (IEC 61980, ISO 19363, SAE J2954). Ces futurs standards n'incluent pas les systèmes d'alimentation dynamique. Peu de systèmes d'alimentation sans contact en roulant existent actuellement. Ce manuscrit n'a pas donc pour objectif d'analyser leur interopérabilité mais d'apporter une certaine sensibilité sur ce sujet. Des travaux concernant l'interopérabilité des systèmes de charge sans contact à l'arrêt ont déjà été réalisés dans le cadre du projet français Cineli et européens WIC2IT et concernent principalement les différentes géométries possibles de bobines [26].

II.7 Les avantages:

Avec une énergie sans fil, nous n'aurions plus à nous soucier de tout cela. Nous pourrions facilement recharger nos téléphones en position couchée dans nos lits et pas de se lever pour trouver le cordon d'alimentation et le brancher, et avoir nos ordinateurs portables à court de batterie qui pourrait devenir une chose du passé.

Cependant, les scientifiques ne s'intéressent pas à notre confort et notre tranquillité d'esprit, ils ne pensent que par l'expérimentation de transmission d'énergie sans fil et à repousser les limites de cette technologie émergente. Et oui, Monsieur, ils ont pour cette technologie des projets plus grands.

En outre, l'énergie sans fil permettrait de réduire considérablement les coûts associés à la fabrication et le maintien de connecteurs directs, et il serait plus facile de garder l'équipement médical électrique stérile en éliminant le besoin de les vérifier constamment.

II.8 Les inconvénients :

Comme d'autre technologie, cette dernière a ses désavantages :

- Faible quantité d'énergie et durée de recharge plus longue.
- Une technologie sans fil nécessitant un cordon d'alimentation.
- Le paradoxe dans la technologie dite « sans fil » c'est qu'elle nécessite quand même l'utilisation d'un cordon pour relier la base de charge au secteur.
- Technologie complexe.
- Dans le cas du transfert radiatif à hautes fréquences, le système peut présenter des risques pour la santé.
- Technologie coûteuse et peu écologique aux vues du nombre de composants obligatoires pour la faire fonctionner.
- Il présente un certain nombre de limitations d'ordres technologiques, environnementaux ou biologiques (niveau de puissance tolérée ; compatibilité électromagnétique).
- Problème d'acceptabilité de système par un grand public.

Conclusion :

Les différentes techniques ainsi que les domaines d'applications du transfert d'énergie sans contact ont été cités dans ce chapitre.

Pour atteindre notre objectif qui est la recherche du point de puissance maximal qui permet un transfert d'énergie optimal, nous allons étudier un circuit résonant parallèle ensuite vérifier et comparer les résultats théoriques et expérimentaux obtenus.

Chapitre III :

Modélisation de suivi

(tracking) de la fréquence de

résonance

Introduction :

Dans ce chapitre nous parlerons de la simulation d'un circuit résonant parallèle (RLC), pouvant fonctionner à haute fréquence. Nous porterons notre intention sur la recherche d'une fréquence de résonance qui nous permet de trouver le point de puissance optimal afin d'avoir un transfert d'énergie maximal.

Lorsque les valeurs de la résistance **R** du circuit, de l'inductance **L**, de la capacité **C** et de la tension aux bornes du circuit sont connues, les résultats théoriques peuvent nous guider bien prédire au départ la fréquence de résonance. Par contre dans le cas du transfert d'énergie sans contactant contact, Les systèmes doivent pouvoir charger en différentes positions de l'inducteur et d'induit, ce qui se traduit par des inductances mutuelles changeantes conduisant à des fréquences de résonance différentes. Pour y remédier à ce problème, il faut concevoir un système de commande à boucle fermée qui sera capable de tracer la fréquence de résonance souhaitée tout en assurant un transfert maximal d'Énergie. Dans ce concept, notre travail va prendre comme idée principale la fameuse technique dite MPPT (Maximum Power Point Tracking) avec quelques changements techniques à cause de l'aspect fouillant et sensible du phénomène de résonance.

III.1 MPPT définition :

Un système MPPT est un ensemble de composants incluant des onduleurs, des chargeurs de batteries, et des panneaux solaires. L'objectif est d'obtenir la puissance maximale possible depuis un (ou plusieurs panneaux photovoltaïques), L'énergie délivrée par les cellules photovoltaïques dépend d'une équation complexe mettant en relation le rayonnement solaire, la température, et la résistance totale du circuit, ce qui conduit à une puissance de sortie non linéaire. Cette puissance peut être analysée dans un graphique $I=f(U)$ à double entrée, en comparant l'intensité I de sortie en fonction d'une tension U (aussi appelée V dans le graphique).

Il existe plusieurs algorithmes qui gèrent le système MPPT, et permis :

- 1) Algorithme perturbation et observation.
- 2) Méthode par incrémentation de conductance.
- 3) Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension.
- 4) Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant.

Pour tous ces types d'algorithmes, la perturbation se fait soit sur le courant ou sur la tension

des convertisseurs en question. Par contre ce que nous voulions ici, c'est de réagir directement sur la fréquence et observer la puissance active à maximiser.

III.2 Modèle de simulation :

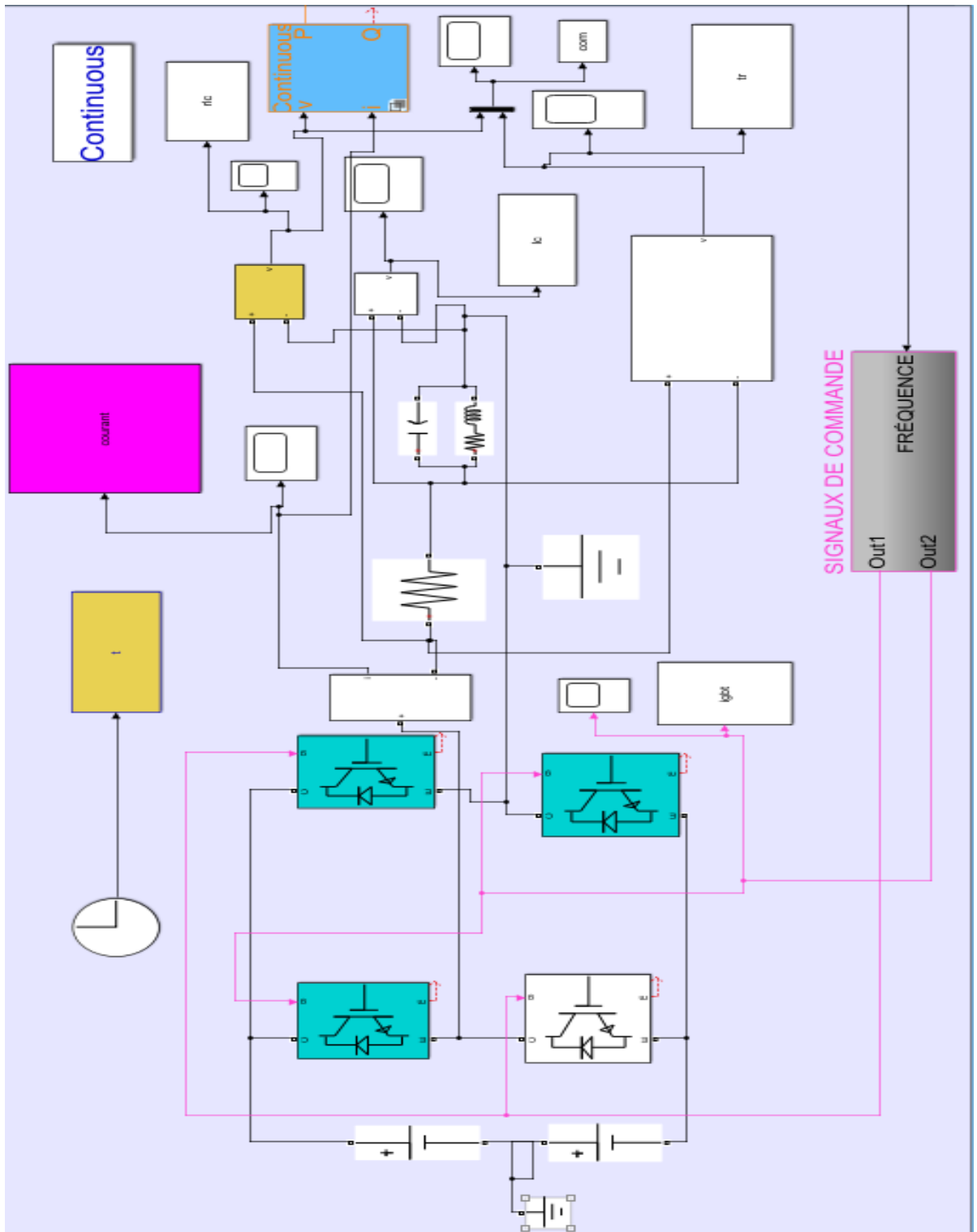
Le modèle ci-dessous figure (III.1) est constitué d'un onduleur monophasé qui génère une tension alternative à partir d'une source de tension continue (100V). Cet onduleur est commandé à l'aide d'une commutation de quatre IGBT placés en antiparallèle avec des diodes pour assurer la bidirectionnalité du courant. L'onduleur est relié à une résistance **R** en série avec un circuit parallèle composé d'un condensateur **C** et d'une bobine **L** pour simuler le système de transfert d'énergie. Le premier bloc, après les mesures des tensions et des courants et celui de puissance. A l'issue de ce dernier se trouve un bloc pour le calcul de la différence de puissance à chaque simulation avec celle retardée avec un DeLay bien étudié. Les différences de puissance nous provoquent les changements en fréquences (augmentation ou diminution). Par le biais de ces fréquences respectées, les signaux de commande sont générés à chaque itération permettant le maintien de la puissance maximale une fois atteinte (bloc de fréquence).

III.2.1 Résultats de simulation et interprétations :

Tableau des paramètres :

Tableau III.1 : Tableau des paramètres utilisés.

Paramètres	Valeurs
La capacité C	0,01
La bobine L	0,0001
La résistance R	100×r
La résistance interne r	0,1
Fréquence initiale finit	84
Différence de fréquence Δf	4
Le retard (τ)	1,5



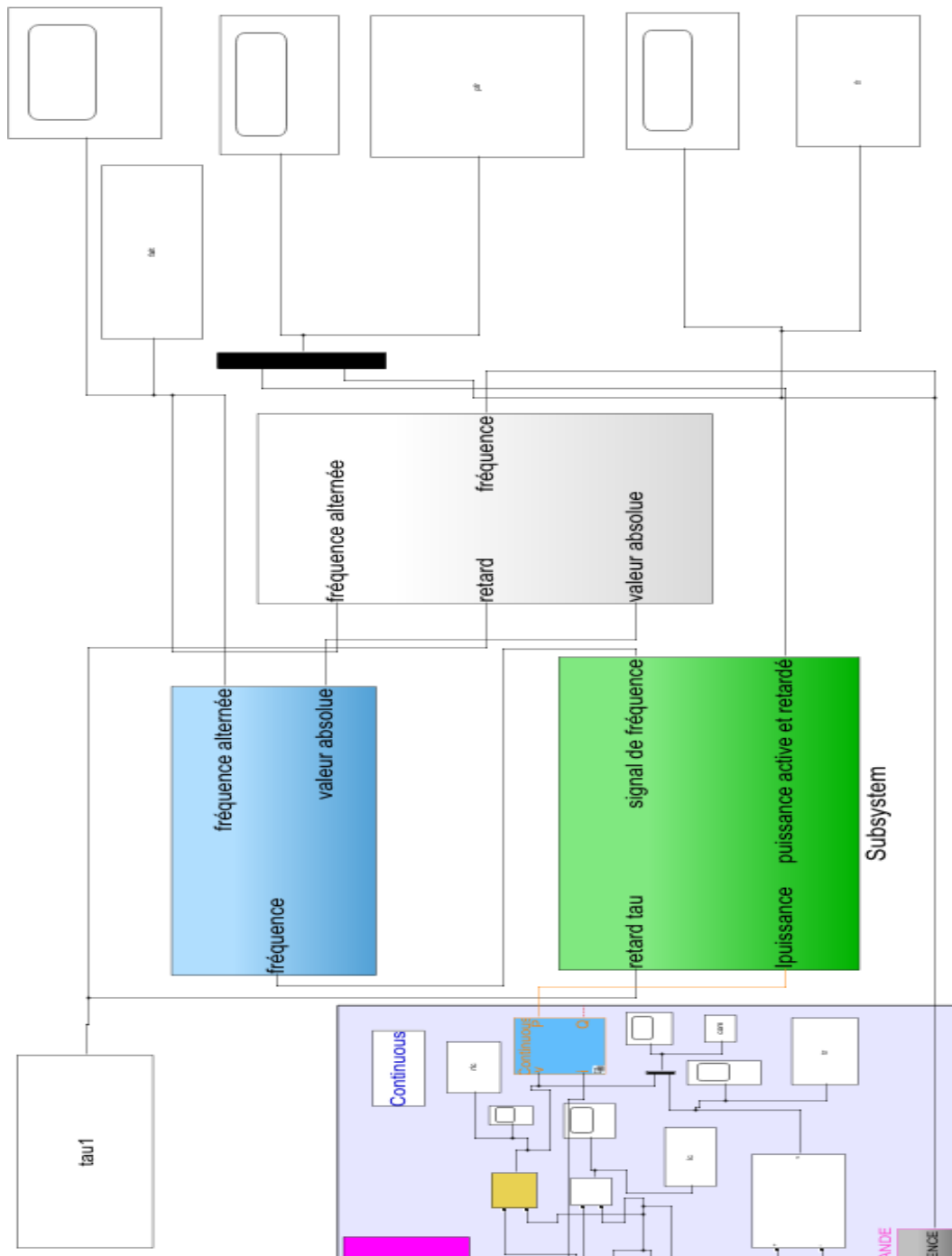
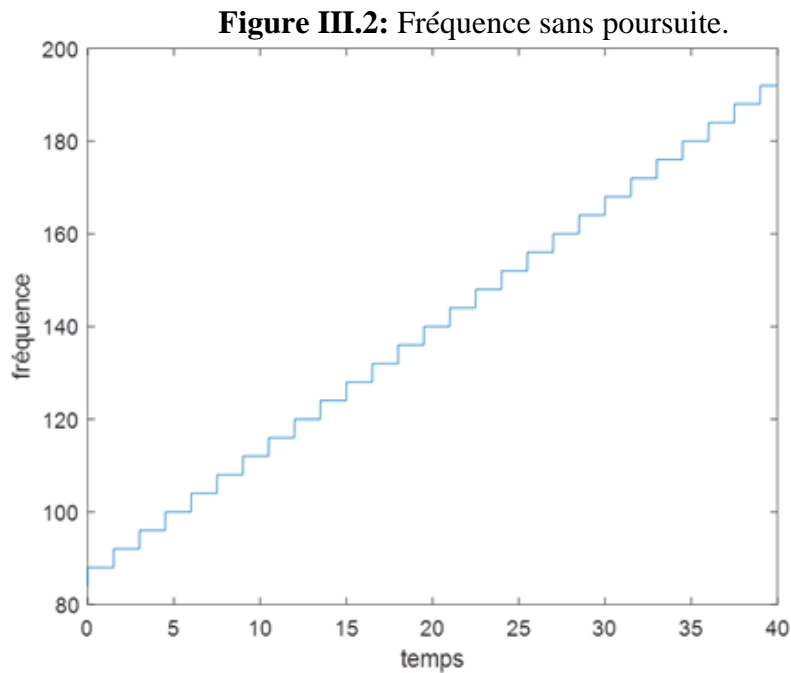


Figure III.1 : Modèle de simulation.

III.2.1.1 Sans la poursuite de la fréquence de résonance :

Dans un premier lieu, on réalise une simulation qui ne dépend pas de la puissance maximale. La fréquence dans ce cas est augmentant Figure (III.2) :



La puissance active augmente jusqu'à atteindre la valeur maximale, ensuite elle diminue. Cela signifie que la fréquence de résonance est atteinte mais la fréquence continuait d'augmenter.

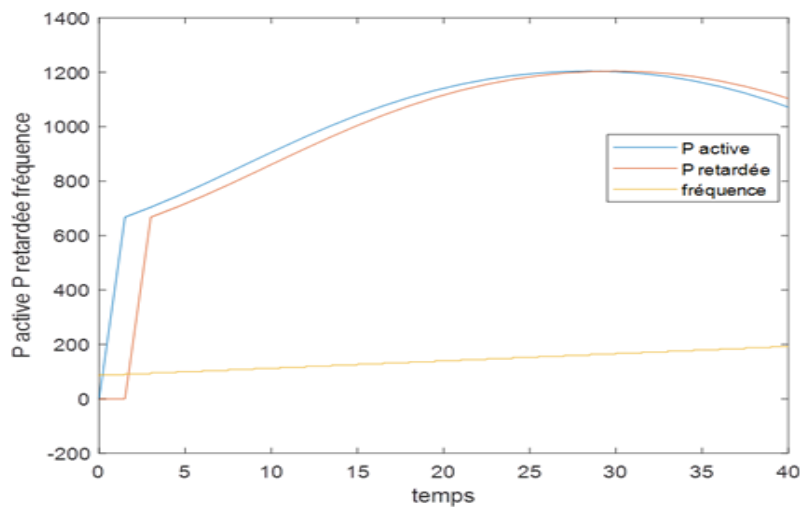


Figure III.3 : Puissance sans poursuite.

La fréquence de résonance calculée pour la valeur de l'inductance $L=0.0001$ et de la capacité $C=0.01$ est à :

$$f = \frac{1}{2\sqrt{LC}} = 159.1549 \text{ Hz} \tag{III.1}$$

D'après la maximum de la puissance qui est suite dans les 30 secondes Figure (III.3) nous pouvons voir qu'à la Figure (III.2), la valeur de la fréquence correspondait à 60 Hz. Ce qui est un

excellent indice du passage par la résonance parce que la valeur calculée est de 159.1549 HZ

III.2.1.2 Avec la poursuite de la fréquence de résonance :

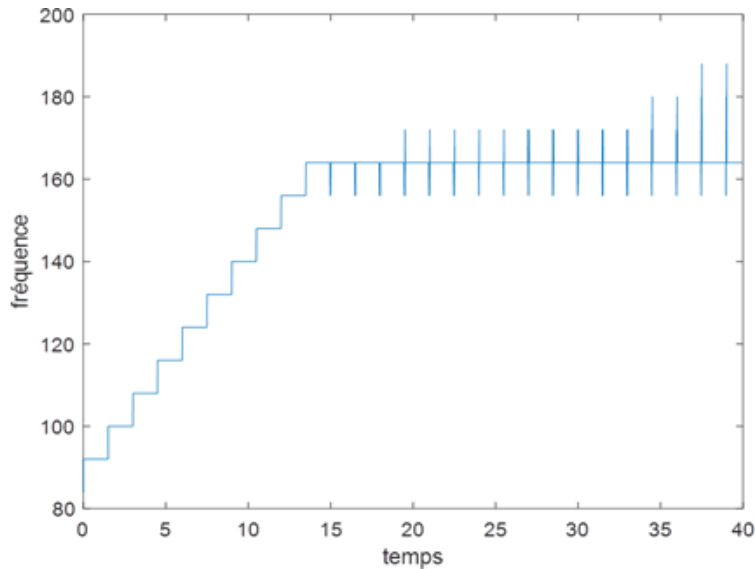


Figure III.4 : Fréquence avec poursuite.

Dans cette partie, la fréquence dépendra de la différence de la puissance avec la puissance retardée (retard τ). Toute la dynamique sera reliée au bon choix des paramètres de réglage surtout le retard en question (il faut qu'il soit suffisant pour dépasser chaque perturbation due au changement de fréquence et il ne doit pas être très grand sinon toute la commande sera inefficace).

D'après la figure (III.4) la fréquence augmente jusqu'à atteindre la fréquence de résonance (proche de la valeur calculée 159.1549 Hz). On observe que la fréquence tend à se stabiliser avec des petites fluctuations dues aux erreurs numériques issues des choix des méthodes de résolution, le retard lui-même, la valeur d'incrément Δf et autres... etc .

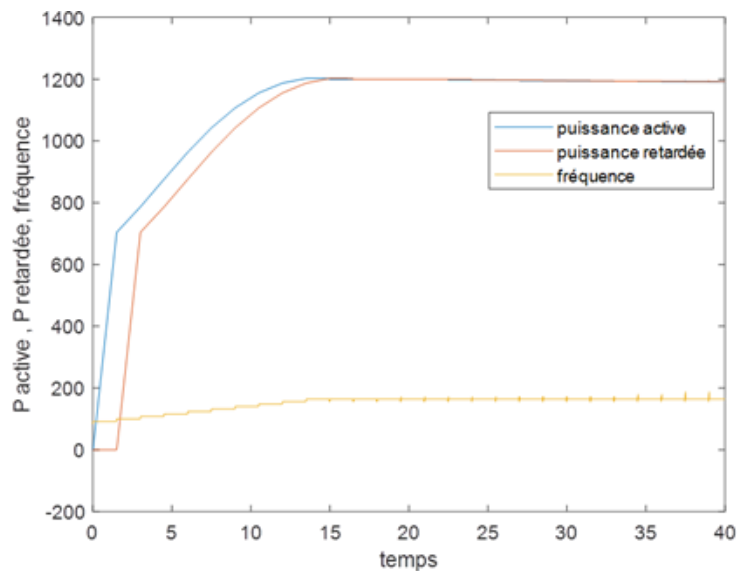


Figure III.5 : Puissance avec poursuite.

La puissance active augmente jusqu'à atteindre son maximum et reste inchangée d'où le grand avantage de notre transfert à puissance maximale Figure (III.5) ne sera pas possible sans la boucle fermée de ce système.

III.2.1.3 Observation :

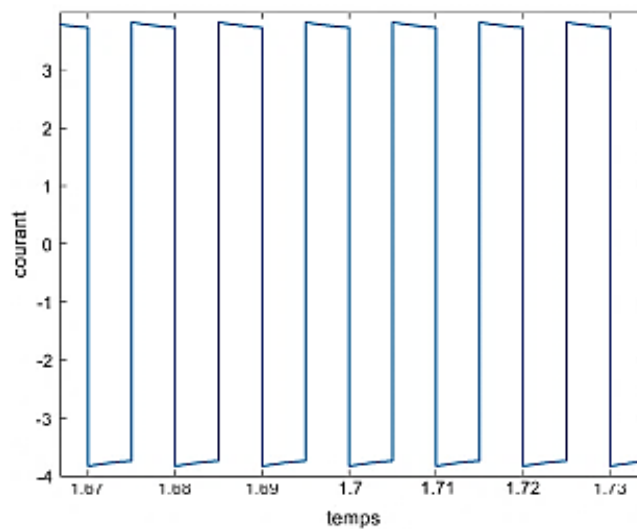


Figure III.6: Courant électrique aux bornes de la charge (RLC).

Le courant délivré par l'onduleur et qui alimente la charge doit avoir une forme obéissante à la résonance (comportement résistif pur).

La figure (III.6) montre les dernières périodes du courant en créneaux et d'amplitude 10A puisque la tension maximale est de 100V et la résistance est égale à 10Ω. On observe aussi la

même forme de tension au borne de la charge ce qui explique la compensation totale Figure (III.6).

Les chutes de tentions faibles sont restée en échange entre la capacité et l'inductance du à quelques imprécisions du système de commande (Δf , retard τ)

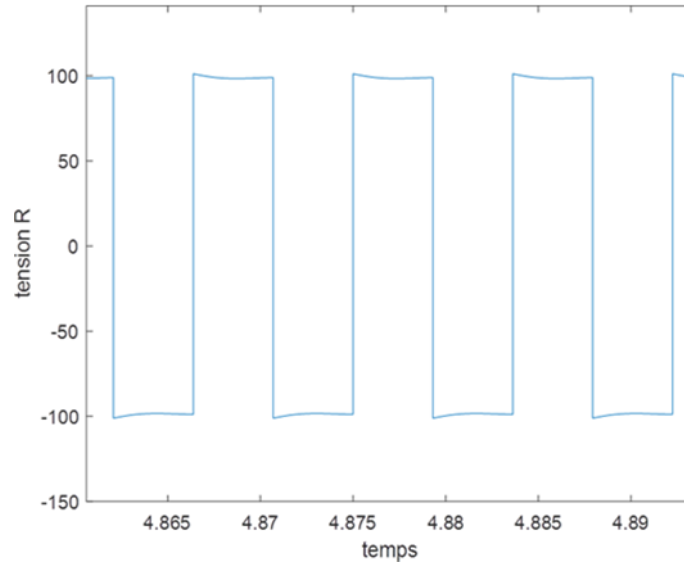


Figure III.7 : Tension de la résistance.

En superposant la tension au borne de la résistance et elle de tout la branche RLC on trône qu'elles sont presque identique Figure (III.7).

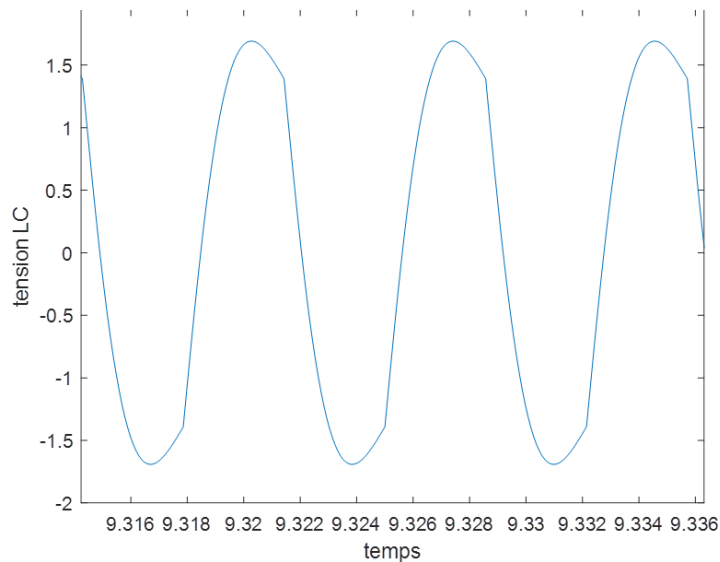


Figure III.8 : Tension aux bornes de l'inductance et du condensateur.

L'inductance avec sa résistance interne (r) sont en parallèle avec le condensateur, on remarque que la courbe varie périodiquement (charge et décharge).

Le circuit résonant parallèle est appelé aussi circuit Bouchon (car lorsque $L\omega=1/(C\omega)$) le

courant total I est nul quelle que soit la grandeur de la tension aux bornes de la charge. L'ensemble L et C en parallèle oppose un obstacle aux courants de pulsation c'est pourquoi qu'on dit qu'il constitue un circuit Bouchon (pour cette pulsation).

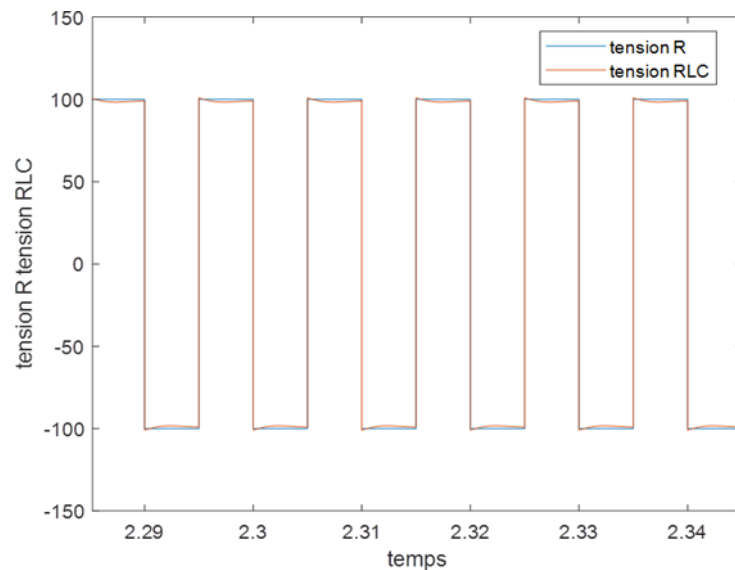


Figure III.9: Comparaison entre U_{RLC} et U_R .

En comparant les deux tensions on observe qu'elles sont presque identiques en formes et en valeurs donc on peut dire que la charge est résistive (dans le cas de la présence de la résonance).

$$U_{RLC} = U_R = 100V.$$

III.2.2 Influence de l'inductance sur la fréquence de résonance :

Pour la variation de l'inductance, on a pris la méthode expérimentale de Frédéric Legrand comme référence [36] Figure (III.10).

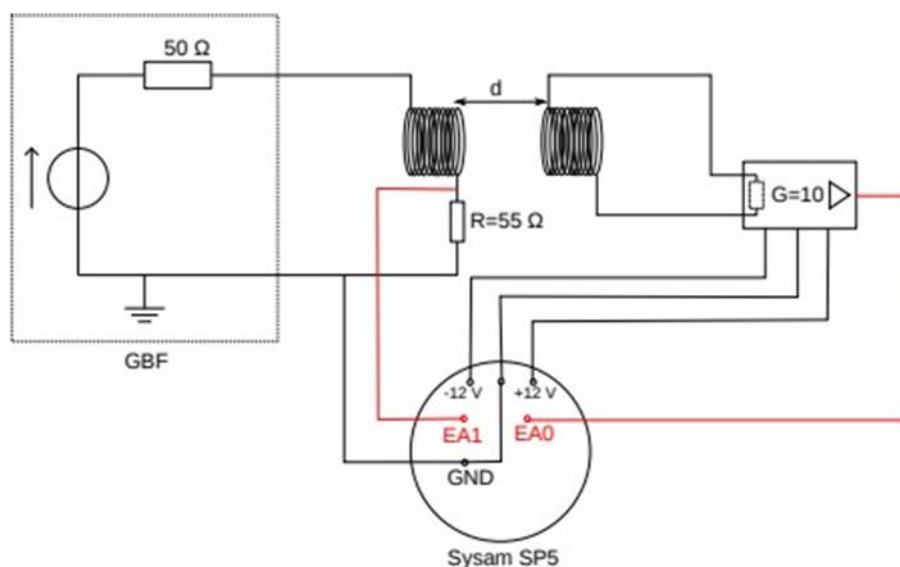


Figure III.10 : Expérience de Frédéric Legrand.

Les résultats obtenus de cette expérience nous offrent les valeurs de l'inductance en fonction de la distance de réparation conformément à la figure suivante :

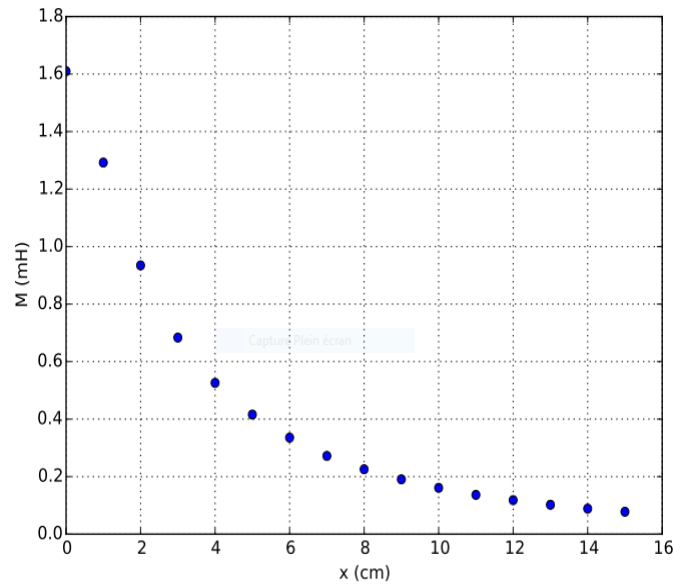


Figure III.11 : Inductance mutuelle en fonction de la distance entre deux bobines.[36]

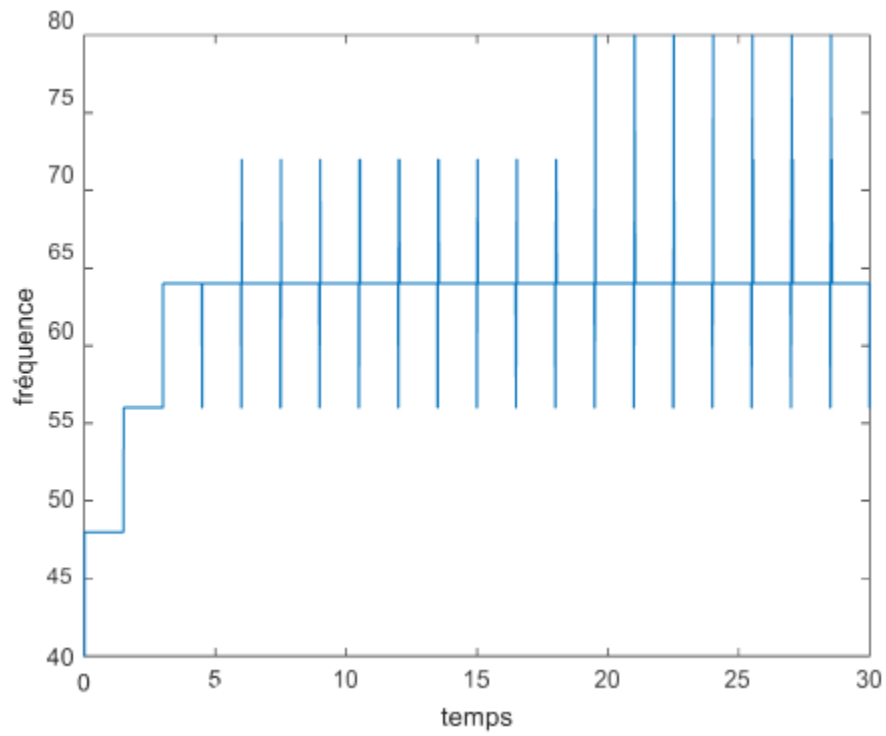
D'après la figure (III.10), On peut tirer quelques valeurs de l'inductance et les insérées séparément à chaque simulation à la place de la valeur de l'inductance de notre circuit.

Les trois valeurs choisies sont :

Tableau III.2: Valeurs des inductances en fonction de la distance.

Inductance M (mH)	Distance x (cm)	Fréquence de résonance calculée (Hz)
0,7	3	60.2046
0,21	8	109.8830
0,1	14	159.23565

III.2.2.1 Résultats de simulation :

Figure III.12: pour $L = 0,7 \text{ mH}$

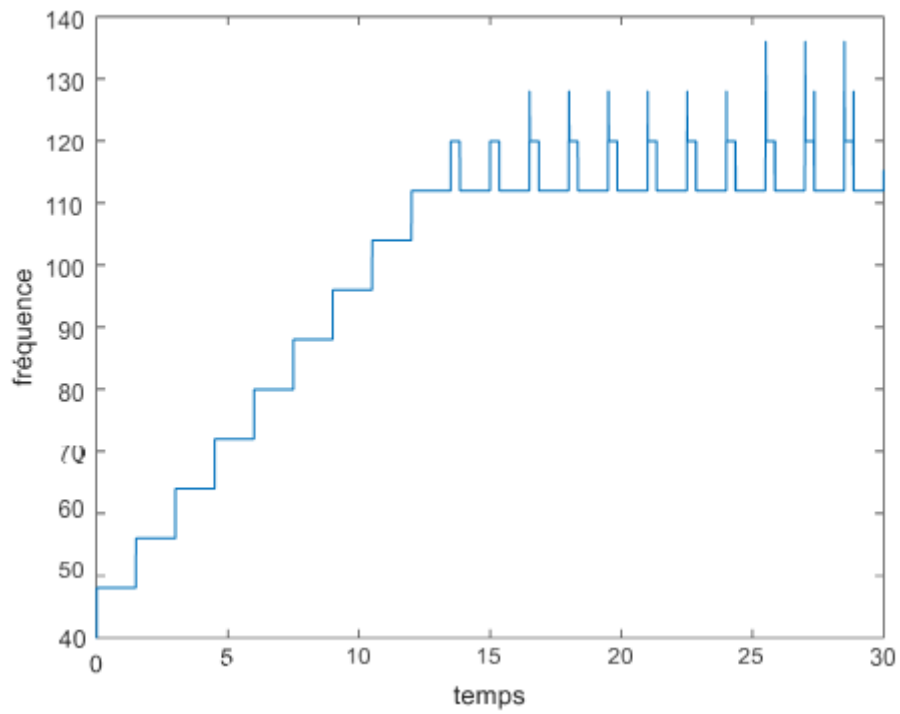


Figure III.13: Pour $L=0,21$ mH.

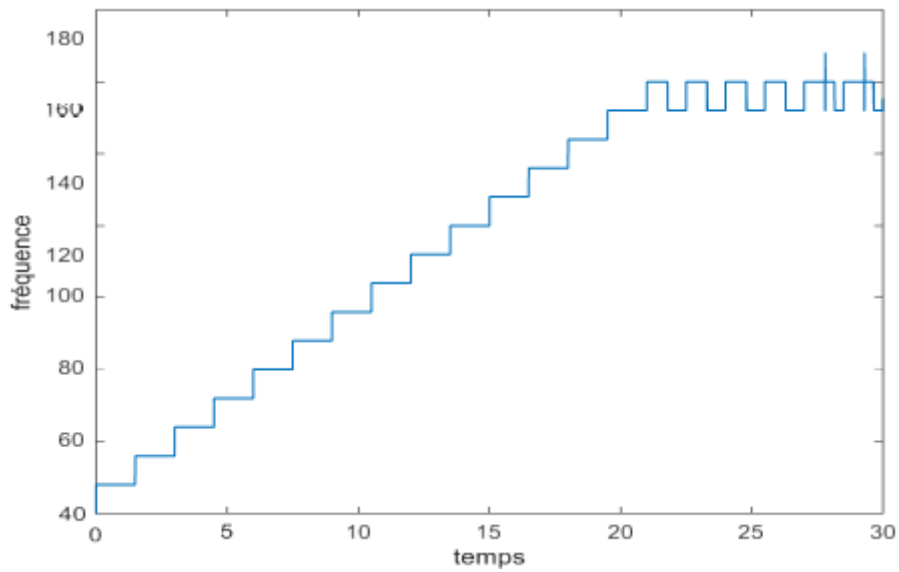


Figure III.14 : Pour $L=0,1$ mH

D'après les résultats obtenus, on remarque qu'à chaque fois la fréquence se stabilise à la bonne valeur de la résonance la qualité de convergence dépend du choix de Δf qui doit être diminuée pour des fréquences de résonance basses. Voir table (III.3)

Tableau III.3 : Comparaison entre les fréquences simulées et celles calculées.

Fréquence simulée (Hz)	Fréquence calculée (Hz)	Différence de fréquence (Hz)
64	60.2046	4,2046
112	109.8830	3,8830
158	159.2356	1,2356

Conclusion :

Ce chapitre est la partie la plus importante du projet où l'implémentation de la technique de poursuite de la fréquence de résonance est réalisée. Celle-ci, n'est pas facile à concevoir à cause de la non-linéarité du phénomène qui pousse régulièrement tout le système vers l'instabilité. Pour réussir, nous avons parcouru le même chemin que des techniques anciennes se basant sur la MPPT avec ses algorithmes fiables et qui continuent à exister jusqu'à maintenant dans l'industrie. La différence entre les algorithmes issus de la MPPT et le nôtre, c'est qu'ils s'appuyèrent sur la variation de la tension ou de courant par contre celui où nous adoptons agit directement sur la fréquence de commutation des IGBT. De cette manière nous aurons des réponses rapides mais pleines d'harmoniques à filtrer. Cette technique est la plus intéressante dans le transfert d'énergie sans contact car dans ces derniers les valeurs de tensions des onduleurs sont constantes et les inductances mutuelles varient avec les positions et les formes de bobinage.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons effectué des simulations sur des systèmes de transfert d'énergie sans contact avec les possibilités de profiter du phénomène de résonance ou particulièrement de Ferro- résonance puisqu'on ne pourra pas s'en passer des parties ferromagnétiques en électrotechnique qui sont d'excellents conducteurs du champ magnétique.

Profiter de la résonance veut dire un transfert maximal d'énergie active, aussi on dit la compensation de l'énergie réactive ou tout simplement maximiser le facteur de puissance. Dans un système de transfert d'énergie sans contact, les bobines sont les éléments essentiels de l'opération. Elles sont au minimum deux, situés en face et dont la forme et l'entrefer sont d'une importance capitale. Avec les deux bobines, on peut parler d'une seule inductance qui rassemblera les effets des inductances propres et de la mutuelle. La variation en inductance est causée par l'inductance mutuelle qui est directement liées aux distances entre les deux bobines et à leurs inclinaisons.

Dans un premier temps, nous avons pris la valeur de l'inductance fixe. Ce qui peut prédire un transfert d'énergie avec les deux enroulements statiques (ne bougent pas mais sans se toucher). La capacité fixe, est reliée aux condensateurs rajoutés dans ce genre de dispositifs. Nous avons effectué plusieurs simulations dont le but est la poursuite (tracking) de la fréquence de résonance et le maintien de cette dernière avec un système de control de puissance maximale. Nous avons constaté avec les calculs théoriques que notre système tend toujours vers la vraie valeur de la fréquence de résonance.

Comme étude paramétrique utile, nous avons pris des valeurs d'inductances similaires à ceux trouvés en littérature. Ils s'agissaient des mesures pratique des inductances en fonction d'un éloignement linéaire de bobines. Dans ces cas, le système aura la possibilité de poursuivre des fréquences de résonances variables.

Cette approche simple, inspirée de la MPPT, où toute sa mise en œuvre est réalisée sans trouver de vraies similitudes en littérature. Elle mérite largement d'être revu est modifiée aux futures.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] Mohammed Ibrahim, « Analyse d'interopérabilité d'un système de recharge sans contact pour véhicule électrique », Thèse de doctorat université Paris-Sud, Ecole doctorale science et technologie de l'information, des télécommunications et des systèmes, Septembre 2014.

[2] Swee Peng Ang : Ferro résonance simulation studies of transmission systems, these doctorat.

[3] Christophe Prévé et Robert Jeannot : Guide de conception des réseaux électriques industriels

[4] Philippe Ferracci : La Ferro résonance, Cahier technique Schneider.

[5] Richard Gagnon : Étude de la Ferro résonance dans les réseaux compensés séries et shunt, thèse doctorat.

[6] I. Kharrat. Modélisation et réalisation d'un système de récupération d'énergie imprime : caractérisation hyperfréquence des matériaux papiers utilisés. Université Grenoble Alpes, 2014.

[7] H. Takhedmit. Modélisation et conception de circuits de réception complexes pour la transmission d'énergie sans fil à 2.45 GHz. Ecole Centrale de Lyon, 2010.

[8] https://en.wikipedia.org/wiki/Magne_Charge

[9] C. T. Rim and Chris Mi, Wireless Power Transfer for Electric Vehicles. 2017

[10] <https://www.waseda.jp/top/en/news/49596>

[11] A. Brecher and D. Arthur, "Review and Evaluation of Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Transit Applications (FTA Report No. 0060)," no. 0060, pp. 1–61, 2014

[12] http://witricity.com/wp-content/uploads/2017/12/DRIVE_11_20171201.pdf

[13] <https://www.pluglesspower.com/gen2-tech-specs/>

[14] Karim Kadem, « Modélisation et optimisation d'un coupleur magnétique pour la recharge par induction dynamique des véhicules électriques », Thèse Université Paris-Saclay, 2020

[15] N. Tesla, "Apparatus for transmission of electrical energy.," US649621, 15-May-1900.

[16] N. Tesla, "System of transmission of electrical energy.," US645576, 20-Mar-1900.

[17] M. Kazmierkowski and A. Moradewicz, “Unplugged But Connected: Review of Contactless Energy Transfer Systems,” IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 6, no. 4, pp. 47–55, Dec.2012.

[18] M. Hanazawa and T. Ohira, “Power transfer for a running automobile,” in Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission : Technologies, Systems, and Applications (IMWS), 2011 IEEE MTT-S International, 2011, pp. 77–80.

[19] C. Liu and A. P. Hu, “Steady state analysis of a capacitively coupled contactless power transfer system,” in Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE, 2009, pp. 3233– 3238.

[20] J. Kim and F. Bien, “Electric field coupling technique of wireless power transfer for electric vehicles,” in 2013 IEEE TENCON Spring Conference, 2013, pp. 267–271.

[21] Lhafhaf, A., El alaoui, A., El jalouli, M., Mattered, D. et Obdam, G. (2014).Recharge sans fil des téléphones mobiles. Repéré à

http://thierryperisse.free.fr/documents/projet_linel/projets-L3EEAREL/projet-Thierry/projet-chargeur-batterie-smartphone/SPI_FIPA17_Chargeur_sans_fil_de_telephones_mobiles.pdf

[22] Messaad , B . Etude électromagnétique du transfert sans fil d'énergie par voie de couplage inductif résonant série-parallèle. Diplôme de master. génie électrique. Bejaia : Université Abderrahmane Mira, 2017.

[23] Caillierez, A.,M. Etude et mise en œuvre du transfert de l'énergie électrique par induction :Application à la route électrique pour véhicules en mouvement. Thèse de doctorat. génie électrique. Gif-sur-Yvette : Université paris-saclay,2016.

[24] Medjebar , I., Ouinharoun, G . Transmission sans fils d'énergie électrique par voie d'induction magnétique. Diplôme de master. génie électrique. Bejaia : Université Abderrahmane Mira, 2016.

[25] Pauline, B., Mariette ,M. L'électricité sans fil. Comment peut-on transmettre du courant d'un point A à un point B sans utiliser de fil entre les deux ? Repéré à <https://docplayer.fr/8005276-L-electricite-sans-fil.html>

[26] M. Ibrahim, "Wireless Inductive Charging for Electrical Vehicles: Electromagnetic Modelling and Interoperability Analysis.," Université Paris Sud-Paris XI, 2014.

[27] Frédéric Legrand " Mesure d'une inductance mutuelle", Travaux pratique Licence Creative Commons, (20 November 2013).

Résumé :

Dans ce mémoire, nous présentons une étude ainsi qu'une simulation d'un système de transfert d'énergie à résonance.

L'objectif de ce mémoire est de contribuer à l'amélioration des études de conception de la résonance et de la ferrorésonance pour prendre les bons moyens correctifs qui s'imposent, ainsi les progrès récents dans le domaine des mathématiques et de l'analyse numérique nous permettent maintenant de disposer du cadre mathématique et des outils numériques adaptés à son étude ces outils nous conduisent à mieux comprendre et d'étudier plus finement le phénomène de ferrorésonance. Pour prédire le comportement du circuit résonant parallèle lors de son fonctionnement nous avons utilisé la simulation. Nous nous sommes orientés vers le tracking de la fréquence qui permet d'avoir la fréquence de résonance qui à son tour contrôle la puissance active produite par ce système. Cette fréquence de résonance nous aide à maintenir la puissance à son point maximal afin d'avoir un transfert d'énergie optimal.

Mots clés :

Résonance-Ferrorésonance-Transfert d'énergie à résonance.

Abstract:

In this thesis, we present a study as well as a simulation of a resonance energy transfer system.

The objective of this thesis is to contribute to the improvement of resonance and ferroresonance design studies in order to take the correct corrective measures that are required, thus recent progress in the field of mathematics and numerical analysis now allow us to have the mathematical framework and the numerical tools adapted to its study these tools lead us to better understand and to study in more detail the phenomenon of ferroresonance. . To predict the behavior of the parallel resonant circuit during its operation we used simulation. We turned to frequency tracking which allows to have the resonant frequency which in turn controls the active power produced by this system. This resonant frequency helps us to maintain power at its peak for optimal energy transfer.

Key words:

Resonance-Ferroresonance-Resonance energy transfer.

المخلص :

في هذه الرسالة، نقدم دراسة بالإضافة إلى محاكاة لنظام النقل طاقة ظنين.

الهدف من هذه الأطروحة هو المساهمة في تحسين دراسات التصميم الرنين والإرهاب لاتخاذ الإجراءات التصحيحية المطلوبة، وكذلك التطورات الحديثة في الرياضيات والتحليل العددي تسمح لنا الآن للحصول على الإطار الرياضي والأدوات العددية التي تم تكييفها لدراستها أدوات تقودنا إلى فهم أفضل ودراسة بمزيد من التفصيل لظاهرة للتنبؤ بسلوك دارة الرنين الموازية أثناءها العملية التي استخدمناها المحاكاة. لجأنا إلى تتبع التردد الذي يجعل من الممكن الحصول على تردد الرنين الذي بدوره يتحكم في الطاقة النشطة من إنتاج هذا النظام. يساعدنا هذا التردد الرنان في الحفاظ على الطاقة عند نقطتها الحد الأقصى من أجل الحصول على نقل مثالي للطاقة.

الكلمات الدالة:

الرنين - الإرهاب - نقل الطاقة إلى الرنين.