



UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA -BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Mémoire de Fin d'ETUDE

Présenté par :

MEDJEBAR Ilyes et OUINHAROUN Ghilas

Pour l'obtention du diplôme de
MASTER EN ELECTROTECHNIQUE
Option : **Energies Renouvelables**

Thème

**Transmission sans fils d'énergie électrique par voie
d'induction magnétique**

Encadré par :
Pr. Bachir MAUCHE et SALHI Mouhoub

Année Universitaire 2015-2016

Remerciements

On remercie, Dieu, le tout puissant de nous avoir donné la foi qui nous a guidé jusqu'à la réalisation et l'aboutissement de ce projet

On adresse chaleureusement toute notre gratitude à notre promoteur pour le suivi qu'il Nous a accordé au déroulement de ce mémoire, Son soutien et sa patience sans limite, nous ont permis de mener à bien ce travail.

Pr .maouche Bachir, et aussi à Mr salhi Mouhoub pour son aide précieux,

Nos vifs remerciements s'adressent également à tous les membres de nos famille, qui nous ont aidés et pour leur soutien précieux plus qu'on ne peut le dire durant les longues années de notre formation, ce qui leur fait valoir notre grande reconnaissance.

Gratitude à nos professeurs scolaires et universitaires qui nous ont apportés leurs précieux conseils et qui nous ont orientés, assistés et aidés pour y arriver.

Enfin, on remercie toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail, on les remercie tous.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail, aux personnes qui me sont les plus chères :

À mon cher père qui m'a soutenu tout au Long de mes années d'études.

À la mémoire de ma défunte mère.

À mes frères et mes sœurs, en particulier Halim et Moumen

À ma grande sœur et son mari.

À ma grand-mère

À toute la famille

À tous mes amis qui ont contribué de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce projet de fin d'études, aux personnes qui me sont les plus chères :

A mes parents qui m'ont énormément soutenu dans les moments les plus difficiles, partagé mes joies et mes peines, qui se sont toujours sacrifiés pour moi

A mes amis et copains de chambre.

A ma chère grande mère

A ma sœur et mon frère

A tous ceux qui comptent pour moi

A tous ceux pour qui je compte

.

GILAS

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	1
INTRODUCTION GENERALE	3
HISTORIQUE	4
I- Généralités sur la transmission d'énergie électrique	5
I.1- Transport filaire d'énergie	6
I.1.1- Principe de base de production de l'électricité	6
I.1.2- Différents types de courant	6
I.1.3- Utilisation des fils électriques.....	7
I.2- Se débarrasser des fils électriques.....	7
I.3- Courants porteurs	7
I.4- Applications pour la transmission d'énergies sans fil.....	8
I.4.1- Grand public	8
I.4.2- Automobile	8
I.4.3- Industrie.....	9
I.4.4- Médecine	9
I.4.5- Armée.....	10
I.5- Principe de la transmission d'énergie sans fil-	10
I.5.1- Définition du transformateur	11
I.5.2- Constitution	11
I.5.3- Principe de fonctionnement.....	12
I.5.4- Transformateur idéal	13
I.5.5- Fonctionnement du transformateur à vide	14
I.5.6- Fonctionnement du transformateur en charge	15
I.6- Transmission par induction sans circuit magnétique	16
I.6.1- Bobines en couplage total	16
I.6.2- Bobines en couplage partiel	16
I.7- Conclusion	16
II- Modèle axisymétrique de Maxwell	17
II.1- Model général de maxwell	18

II.1.1-	Equation de Maxwell-Gauss	18
II.1.2-	Equation de Maxwell- Thomson	18
II.1.3-	Equation de Maxwell-Faraday.....	19
II.1.4-	Equation de Maxwell Ampère	19
II.2-	Régime quasi-stationnaire.....	20
II.3-	Loi de Lenz-Faraday.....	20
II.4-	Potentiel vecteur magnétique	21
II.5-	Formulation bidimensionnelle en coordonnées cylindriques	22
II.5.1-	Géométries axisymétriques	22
II.5.2-	Equation de diffusion en 2D.....	23
II.5.3-	Gradient du potentiel scalaire électrique	23
II.5.4-	Expression du potentiel magnétique vecteur dans le vide	24
III-	Application de la méthode des circuits couplés	27
III.1-	Modélisation des dispositifs axisymétriques	28
III.1.1-	Equations électromagnétiques couplées	28
III.1.2-	Equation élémentaire du couplage des circuits électromagnétiques	29
III.2-	Application de l'équation intégrale généralisée pour la transmission d'énergie sans fil (couplage standard).....	29
III.2.1-	Formulation intégrale de l'équation relative à l'émetteur...	30
III.2.2-	Discrétisation des domaines d'étude	31
III.2.3-	Discrétisation de l'émetteur	32
III.2.4-	Discrétisation du récepteur	32
III.3-	Calcul de la tension totale	32
III.4-	Application et résultats	34
	CONCLUSION GENERALE	37
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	39

INTRODUCTION GENERALE

Le nombre d'appareils présents dans notre vie quotidienne est en augmentation de plus en plus mais leur fonctionnement est limité par l'éphémère durée des piles et de charge des batteries. La conséquence directe est l'intrusion des chargeurs et câble d'alimentation dans notre quotidien et ce qui tend de plus en plus à limiter la mobilité offerte par les appareils sans fil. Pour résoudre ce problème, le transfert d'énergie sans fil est devenu principalement, pour les appareils portables, un moyen incontestable.

Aujourd'hui les dispositifs de transfert sans fil d'énergie à courte distance, en utilisant l'induction électromagnétique, sont utilisés de plus en plus dans l'industrie pour la recharge et l'alimentation sans contact.

Ce manuscrit est organisé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur le transfert d'énergie filaire et sur la transmission d'énergie sans fil.

Le deuxième chapitre exploite le modèle de Maxwell en le simplifiant au cas de régime quasi-stationnaire et axisymétrique. Le modèle obtenu est résolu par la méthode des circuits électriques couplés.

Le troisième chapitre présente les résultats de simulation et les commentaires éventuels.

HISTORIQUE

Les recherches sur la transmission d'énergie sans fil ont commencé à la fin du 19^{ème} siècle lorsque Hertz et Marconi ont remarqué que l'énergie pouvait être transportée d'un point à un autre sans l'existence d'aucun milieu conducteur. Les bases théoriques de ce phénomène ont été établies par Maxwell à travers des équations établies en 1862.

Pendant la première moitié du 20^{ème} siècle, le manque d'intérêt envers la transmission d'énergie sans fil peut s'expliquer par le manque de moyens techniques, en particulier des générateurs à hautes fréquences et hautes puissances. Les avancées dans le domaine des communications sans fil ont largement aidé au développement des techniques de transmission d'énergie sans fil.

Dans les années 1960, des expérimentations de transmission d'énergie sans fil ont été menées avec des tubes microondes tels que les magnétrons et les klystrons. Egalement en 1963, une antenne rectificatrice ou « rectenna » a été créée pour la réception des ondes électromagnétiques et leur conversion en tension continue.

En 2007, les chercheurs ont démontré avec succès la capacité d'allumer une ampoule de 60 watts, depuis une source électrique située à environ deux mètres de distance, avec un rendement de 40 %. En utilisant deux bobines de cuivre de 60 centimètres de diamètre avec une résonance à 10 MHz. Ils ont pu alimenter l'ampoule même si les deux bobines n'étaient pas dans la ligne de vue.

Un fabricant chinois a présenté en 2010 un téléviseur sans fils capable de fonctionner de façon optimale jusqu'à 80 cm de distance de la source électrique.

En 2012, à Tokyo des fabricant de Smartphone dévoile le premier modèle commercial de téléphone portable utilisant la norme. Cependant, les contraintes techniques relatives à l'alimentation en électricité sans fil (présence d'un émetteur relié au réseau électrique...) font que cet appareil n'est utilisable que dans certains quartiers de la seule ville. [1]

1^{er} CHAPITRE

I- Généralités sur la transmission d'énergie électrique

I.1- Transport filaire d'énergie

I.1.1- Principe de base de production de l'électricité

La matière est constituée d'atomes. Ces atomes possèdent un noyau central constitué de protons, chargés positivement et de neutrons sans aucune charge, Autour de ce noyau, tournent des électrons chargés négativement.[2]

A l'état naturel, l'atome possède autant de protons que d'électrons. Il est donc électriquement neutre. Si par frottement ou polarisation, un électron vient s'ajouter à cet atome, celui-ci devient négatif. Si on contraire, il perd un électron, il devient positif. C'est ce déplacement, ce transfert d'électrons qui est à l'origine de l'électricité. [3]

I.1.2- Différents types de courant

Dans les fils, les électrons se déplacent du pôle négatif au pôle positif. S'ils se déplacent uniquement dans ce sens, notamment grâce à une réaction chimique comme c'est le cas dans une batterie ou dans une pile, le courant est dit continu.

Le courant peut également circuler une fois dans un sens, puis une fois dans l'autre à intervalles de temps réguliers appelés cycles. Dans ce cas, il s'agit d'un courant alternatif. Ce type de courant est préféré à celui du continu car il est plus économique à transporter, moins dangereux et sa valeur efficace est réglable par l'intermédiaire d'un transformateur. [3]

En effet, les prises de courant sont présentes partout, quel que soit le type de locaux, privés ou publics. Plus largement, le réseau électrique constitue une infrastructure qui couvre presque tout le territoire, même les zones les moins denses en population. Cette caractéristique permet de réduire le nombre de câbles et permettre un accès généralisé au téléphone fixe à l'Internet et à la télévision terrestre (technique des courants porteurs).

I.1.3- Utilisation des fils électriques

Pour faciliter les déplacements des électrons, et donc du courant, on utilise des matériaux dits "bons conducteurs" (métaux, gaz, certains liquides...) car ils possèdent des électrons libres car ce sont des électrons faiblement liés à leur noyau atomique et qui facilite donc le passage du courant. Les matériaux qui ne possèdent pas d'électrons libres sont dits "isolants".

Le but des fils électriques est de transporter cette électricité afin de transmettre de l'énergie ou de l'information.[2]

I.2- Se débarrasser des fils électriques

Depuis plusieurs années, les ordinateurs, les téléphones et Internet deviennent sans fil. Mais qui dit sans fil, dit batterie et qui dit batterie, dit chargeur. Un chargeur est composé de fils. Notre objectif est donc et de faire en sorte que le courant électrique puisse se transmettre entre deux points sans utiliser de conducteurs entre les deux, et bien sûr, sans que l'air ne devienne conducteur non plus. [3]

I.3- Courants porteurs

La technologie des courants porteurs est de pouvoir transformer le réseau électrique en support pour le transport de données informatiques. Il permet d'éliminer tous les câbles de transport d'information. Grâce aux techniques de modulation, les ingénieurs sont parvenus à faire cohabiter le courant électrique de basse fréquence (50 Hz) avec des données transmises sur une bande comprise entre 1 et 30 MHz.

I.4- Applications pour la transmission d'énergies sans fil

I.4.1- 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). [3]



Figure I.1 : Exemple de recharge d'un portable dans lieu.

I.4.2- Automobile

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. Grâce au transfert sans fil le conducteur n'a plus besoin de brancher sa voiture à une source d'alimentation. [3]

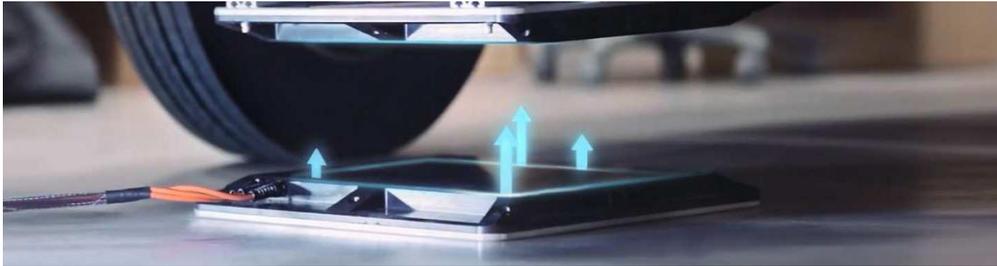


Figure I.2 : Exemple de recharge de batterie d'une voiture

I.4.3- Industrie

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). [1]

I.4.4- Médecine

Le point fort dans ce domaine est de pouvoir assurer la recharge et le fonctionnement d'appareils et de dispositifs divers à distance et très efficacement, et cela représente un grand intérêt dans le domaine médical. En effet, certains dispositifs médicaux implantés exigent un niveau élevé de puissance pour les faire fonctionner. Aussi les charriots médicaux transportant des ordinateurs et d'autres instruments de diagnostic pourraient être rechargés et alimentés sans fil à partir de sources intégrées

tout au long de l'hôpital, ce qui élimine le besoin de câbles et la recharge de la batterie stationnaire. [1]

I.4.5- Armée

Actuellement, il y a un certain nombre de projets militaires en développement. La recharge automatique sans fil pour les systèmes militaires de haute technologie, tels que les robots mobiles sans pilote. On élabore aussi le transfert d'énergie du gilet du soldat au casque et du casque à la lunette optique.



Figure I.3 : Exemple d'alimentation sans fil dans une tenue militaire

I.5- Principe de la transmission d'énergie sans fil-

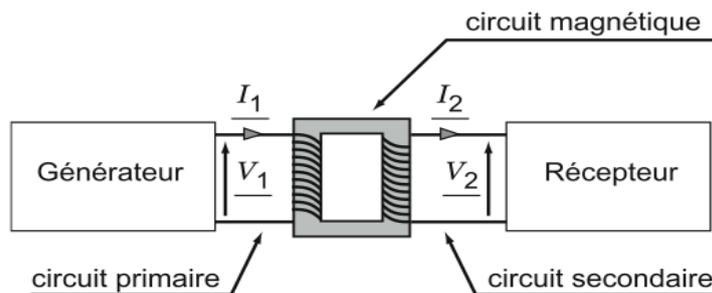
Le principe d'un transformateur électrique est l'exemple le plus courant de transmission d'énergie sans fil. Les bobines du primaire et du secondaire sont électriquement isolées l'une de l'autre. Le transfert d'énergie se fait par couplage électromagnétique connu sous le nom de courant induit. L'inconvénient principal est la proximité requise du récepteur pour permettre le couplage.

I.5.1- Définition du transformateur

Un transformateur est une machine statique à induction électromagnétique destinée à transformer une tension alternative en une nouvelle tension alternative de même fréquence mais d'amplitude généralement différente. Pour ce faire, le transformateur monophasé est constitué d'un circuit magnétique fermé portant deux enroulements. Le premier est alimenté par une source de tension et le secondaire débite sur un circuit de charge. Un transformateur est un quadripôle réversible permettant de transmettre des puissances active et réactive avec un très bon rendement.

I.5.2- Constitution

Un transformateur est constitué d'un noyau de fer, circuit magnétique fermé, autour duquel on a placé deux enroulements électriques indépendants (primaire et secondaire). Les deux enroulements y figurent chacun sur un noyau. Pratiquement, cette séparation n'est pas souhaitable. Elle faciliterait les fuites magnétiques, une partie des lignes de force du flux produit par chacune d'elles se refermeraient dans l'air sans passer dans



chaque bobine et le transformateur fonctionnerait mal.

Le circuit magnétique est formé d'empilements de tôles en forme de E et de I et les deux enroulements prennent place sur la partie centrale.

Pour limiter les pertes magnétiques le noyau est constitué de tôles assemblées (Limitation des courants de Foucault) en alliage Fer Silicium (faible hystérésis).

En théorie le transformateur est parfaitement réversible, mais dans la pratique les enroulements sont imbriqués de façon à obtenir un rendement optimum pour une utilisation dans un seul sens. [5]

I.5.3- Principe de fonctionnement

Le circuit primaire est alimenté sous la tension alternative u_1 qui ensuite engendre un flux magnétique variable dans le circuit magnétique, Le circuit magnétique fermé "canalise" les lignes de champ et le flux ϕ est le même à chaque instant à travers toute section du noyau, le circuit secondaire est donc soumis à un flux variable, il est le siège d'une fem induite. On observe donc une tension alternative u_2 aux bornes du secondaire.

Le courant alternatif qui circule dans l'enroulement primaire génère un flux magnétique variable dans le noyau, cette variation de flux induit dans le secondaire un autre courant ou, si le circuit secondaire n'est pas raccordé à un récepteur, y induit une tension, on dit que le transformateur est à vide quand le circuit secondaire est ouvert, il ne débite alors aucun courant. L'enroulement primaire se comporte dans ce cas comme une self en courant alternatif, une simple inductance qui s'oppose au passage du courant. Le transformateur fonctionne en charge quand un récepteur est raccordé à sa sortie.

Le courant débité par le secondaire crée alors un champ magnétique opposé au champ produit par le primaire. Il s'ensuit une augmentation du courant dans le primaire et en fin de compte il y a égalité quasi parfaite entre la puissance que génère le secondaire et la puissance consommée par l'enroulement primaire en toute rigueur. [5]

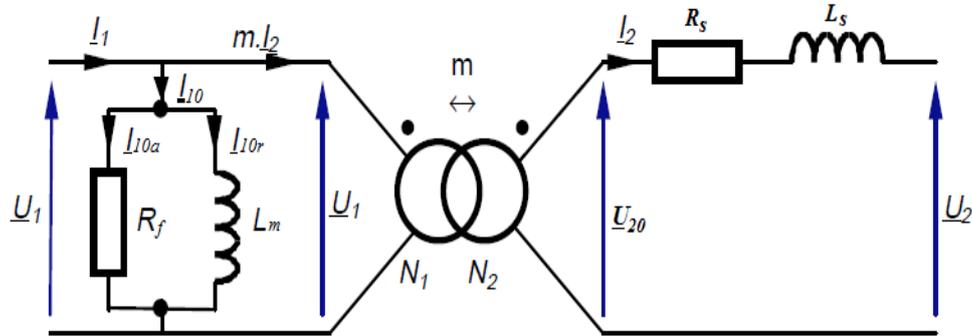


Figure I.5 : schémas équivalent d'un transformateur

Il y a bien quelques pertes entre la puissance que consomme l'enroulement primaire et celle qui sort du secondaire mais en théorie, on peut dire que

$$P_1 = P_2 \quad (I.2)$$

Les transformateurs ont un très bon rendement, de l'ordre de 99%. Les flux magnétiques produits par les courants primaires et secondaires s'annulent, le flux généré par une bobine étant proportionnel au courant et au nombre de spires, on peut comprendre que

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \quad (I.3)$$

I.5.4- Transformateur idéal

Afin de dégager les aspects fondamentaux, et compte tenu des ordres de grandeurs, il est commode d'utiliser la notion de transformateur idéal (sans pertes ni fuites) ou transformateur parfait.

Un transformateur parfait n'a pas de fuite magnétique et n'a pas de pertes joules, $l_1 = l_2 = 0$, $R_1 = R_2 = 0$ et possède un circuit magnétique infiniment perméable sans pertes fer.

Le transformateur réel est, numériquement, assez proche de ces hypothèses, Les équations se simplifient [5].

$$V_1 = jn_1\omega\varphi \quad (I.4)$$

$$V_2 = jn_2\omega\varphi \quad (I.5)$$

$$N_1 \cdot I_2 - N_2 I_2 = 0 \quad (I.6)$$

En éliminant le flux commun et en utilisant la relation d'Hopkinson, on obtient la relation fondamentale

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (I.7)$$

On remarque d'autre part que le flux φ est lié à la tension d'alimentation

$$\varphi = \frac{V_1}{\omega N_1} \quad (I.8)$$

Dans le circuit magnétique, si S est sa section, l'induction a pour valeur efficace :

$$B_{eff} = \frac{\varphi}{s} = \frac{B_{max}}{\sqrt{2}} \quad (I.9)$$

L'induction maximale B_{max} étant limitée par la saturation des matériaux, nous voyons que pour S ω N_1 donnés, la tension applicable à un enroulement est aussi limitée. [5]

$$B_{max} = \frac{\sqrt{2}}{\omega s n_1} v_1 \leq B_{sat} \quad (I.10)$$

I.5.5- Fonctionnement du transformateur à vide

Le transformateur comporte deux enroulements de résistances r_1 et r_2 comportant N_1 ou N_2 spires. Le primaire reçoit la tension $u_1(t)$ et absorbe le courant $i_1(t)$, Le secondaire délivre la tension $u_2(t)$ et un courant $i_2(t)$ nul puisqu'il est à vide. Le flux $\varphi_1(t)$ créé par l'enroulement primaire se décompose en un flux de fuite au primaire $\varphi_1(t)$ auquel s'ajoute le flux

commun $\varphi_c(t)$ dans le circuit magnétique, le comportement du primaire est celui d'une bobine à noyau de fer. [8]

$$U_1 = r_1 i_1 + n_1 \frac{d\varphi_1}{dt} = r_1 i_1 + l_{\varphi_1} \frac{di_1}{dt} + n_1 \frac{d\varphi_c}{dt} \quad (I.11)$$

Le courant au primaire n'est pas sinusoïdal. En conséquence et d'après le théorème d'Ampère, le champ d'excitation, le champ d'induction et donc le flux sont des grandeurs sinusoïdales. Dans ces conditions, on peut utiliser leur notation complexe

$$\underline{u}_1 = r_1 \underline{i}_1 + j l_{f1} \omega \underline{i}_1 + j \omega n_1 \underline{\varphi}_c \quad (I.12)$$

$$\underline{u}_2 = j \omega n_2 \underline{\varphi}_c \quad (I.13)$$

$$n_1 \varphi_1 = n_1 (\varphi_c + \varphi_{f1}) \quad (I.14)$$

I.5.6- Fonctionnement du transformateur en charge

La présence d'un courant dans le bobinage secondaire a pour effet l'existence d'un flux de fuite φ_2 émanant de cet enroulement et nécessite la prise en compte de la résistance du secondaire. [8]

$$\varphi_1 = n_1 (\varphi_c + \varphi_{f1}) \quad (I.15)$$

$$\varphi_2 = n_2 (\varphi_c + \varphi_{f2}) \quad (I.16)$$

$$u_1 = r_1 i_1 + n_1 \frac{d\varphi_1}{dt} = r_1 i_1 + l_{f1} \frac{di_1}{dt} + n_1 \frac{d\varphi_c}{dt} \quad (I.17)$$

$$u_2 = r_2 i_2 + n_2 \frac{d\varphi_2}{dt} = r_2 i_2 + l_{f2} \frac{di_2}{dt} + n_2 \frac{d\varphi_c}{dt} \quad (I.18)$$

Le flux $\varphi_c(t)$ est créé par le champ d'excitation magnétique (t) dans le circuit magnétique. Le théorème d'Ampère sur la ligne moyenne la donne :

$$n_1 i_1 - n_2 i_2 = H \ell \quad (I.19)$$

I.6- Transmission par induction sans circuit magnétique

I.6.1- Bobines en couplage total

Lorsque deux bobinages sont disposés à proximité et dont les axes coïncident, le « partage » de leurs lignes de champs représente un « couplage » magnétique total. Ce couplage correspond aux lignes de champ sortant traversent totalement l'autre [14].

I.6.2- Bobines en couplage partiel

Lorsque deux bobinages sont disposés d'une manière que leurs axes ne coïncident pas, le couplage est « partiel ». Il est impératif de bien dissocier les flux « propres », les flux « mutuels et les flux de fuite. Le flux mutuel étant diminué par les fuites, le flux total intercepté par est inférieur à celui résultant d'un couplage total [13].

I.7- Conclusion

La transmission d'énergie sans fil empreinte le principe de fonctionnement des transformateurs sans circuit magnétique. Pour une étude par les grandeurs électromagnétiques locales on passe par le Modèle axisymétrique de Maxwell.

2^{ème} CHAPITRE

II-Modèle axisymétrique de Maxwell

II.1- Model général de maxwell

Tout au début, les phénomènes électrique et magnétique ont été étudiés séparément les interactions entre ces deux phénomènes ont été mis en évidence pour la première fois par, Ampère(1775-1836) qui a démontré que la source du magnétisme est le courant électrique ,Gauss (1777-1855),qui a démontré que la source du champ électrique est la charge électrique statique ,et faraday (1791-1867)qui relie la création de l'un des champs électrique et magnétique par l'autre et vice versa.

Le couplage des deux phénomènes qu'on regroupe en un mot Electromagnétique, on le doit à James Clerck Maxwell (1831-1879).

Ce génie a exploité les découvertes du précédent, pour donner une formulation la plus complète de l'électromagnétisme liant les grandeurs électriques et magnétique.

II.1.1- Equation de Maxwell-Gauss

Le flux électrique à travers une surface fermée et relie à la charge électrique contenue à l'intérieur de cette surface .le champ électrique est créé par des charges électriques.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (II.1)$$

ρ [C/m³] : Champ scalaire de charges électriques

\vec{E} [m /V] : Champs électrique

II.1.2- Equation de Maxwell- Thomson

Le flux du champ magnétique à travers n'importe quelle surface fermée est nul il n'existe pas de monopoles magnétique ou encore les lignes du champ magnétique n'ont ni début ni fin :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (II.2)$$

Donc \vec{B} est toujours à flux conservatif.

On remarque qu'on n'a pas d'analogue de « ρ » pour un champ magnétique on n'a jamais mis en évidence de « charge magnétique ». [12]

II.1.3- Equation de Maxwell–Faraday

La relation entre la circulation du champ électrique sur un contour fermé et la variation temporelle du flux magnétique à travers une surface qui s'appuie sur ce contour c'est le phénomène d'induction ou le champ électrique est créé par la variation temporelle du champ magnétique :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

\vec{B} [T] : Induction magnétique.

En général, « \vec{E} » n'est pas à circulation conservative, et ne dérive donc pas d'un potentiel scalaire On a ainsi deux sources de champ « \vec{E} ». [12]

II.1.4- Equation de Maxwell Ampère

La relation entre la circulation du champ magnétique sur un contour fermé et le flux de courant à travers une surface s'appuyant sur ce contour et de là on distingue deux types de courants le courant de conduction « J_c » et le courant de déplacement « J_D » :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.4})$$

$$\begin{cases} \vec{j}_c = \vec{j} = \sigma \vec{E} & \text{(a)} \\ \vec{j}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{\partial(\epsilon \vec{E})}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} & \text{(b)} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

\vec{H} [A/m] : Champ magnétique

Où « J_c » est le courant de conduction et « J_D » est le courant de déplacement

μ_0 : Constante de perméabilité absolue du vide.

II.2- Régime quasi-stationnaire

Les équations qui précèdent s'appliquent à des états variables quelconques. Cependant, dans le domaine de l'électrotechnique, la fréquence utilisée permet de négliger tout aspect de propagation du champ électromagnétique. C'est l'approximation des états quasi stationnaires (ARQS) ou des régimes lentement variables.

Pour que cette simplification soit légitime, il suffit que le dispositif électromagnétique considéré soit entièrement contenu dans une région de l'espace où toutes les dimensions sont petites par comparaison à la longueur d'onde ($\lambda = c/f$) où « c » représente la célérité de la lumière. L'utilisation de cette approximation pour les équations de Maxwell, revient à négliger le courant de déplacement ($\frac{\partial D}{\partial t}$) devant le courant de conduction (J_c).

$$\left\{ \begin{array}{l} r\vec{\partial}_t \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{E} = 0 \\ r\vec{\partial}_t \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \\ \text{div} \vec{B} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.6})$$

L'ARQS permettant en résumé de traiter tous les problèmes liés au phénomène d'induction électromagnétique sans faire intervenir ceux liés à la propagation ; ce qui est tout à fait justifié, au sens des ordres de grandeurs, dans le domaine de l'électromagnétisme envisagé. [6]

II.3- Loi de Lenz-Faraday

La loi de Faraday énonce que la force électromotrice est induite dans un circuit fermé par la variation d'un champ magnétique et elle est directement proportionnelle à cette variation.

En 1934, Lenz fait remarquer le sens absolu du signe « moins » dans la formule de l'induction. Ce signe n'est pas lié à la convention algébrique

choisie pour exprimer les forces électromotrices et il est indépendant de la convention d'orientation du circuit.

En clair, ce signe à une signification physique fondamentale. Il traduit le fait que les effets de l'induction sont modérateurs car ils s'opposent à la cause qui les a produits [2] :

$$e(t) = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{II.11})$$

II.4- Potentiel vecteur magnétique

Le potentiel vecteur magnétique est introduit du fait que le champ magnétique est de divergence nulle. L'analyse vectorielle indique qu'un champ vectoriel de divergence nulle peut toujours s'exprimer sous la forme d'un rotationnel d'un champ de vecteur :

$$\vec{B} = r\vec{\text{ot}}\vec{A} \quad (\text{II.12})$$

Par ailleurs, l'équation de Maxwell-Faraday relie les variations temporelles du champ magnétique aux variations spatiales du champ électrique ce qui est à l'origine du phénomène d'induction électromagnétique selon l'équation (II.6).

On en déduit que :

$$r\vec{\text{ot}}\left(\vec{E} + \frac{\partial\vec{A}}{\partial t}\right) = 0 \quad (\text{II.13})$$

Le champ électrique peut s'exprimer sous la forme de la somme de l'opposé de la dérivée temporelle du potentiel vecteur et d'un terme de rotationnel nul. Ce dernier que l'on peut exprimer sous la forme d'un gradient d'une quantité appelé dans ce contexte potentiel électrique [6] :

$$\vec{E} = \text{grad}V - \frac{\partial\vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.14})$$

II.5- Formulation bidimensionnelle en coordonnées cylindriques

II.5.1- Géométries axisymétriques

Considérons deux configurations, un inducteur plan spiral face à une charge plane et un inducteur solénoïde entourant une charge cylindrique. Dans les deux cas, en négligeant l'élicité des spires inductrices, les systèmes possèdent une symétrie de révolution (système axisymétrique).

Le problème est donc bidimensionnel car la densité de courant et le potentiel vecteur magnétique n'ont qu'une seule composante suivant la direction angulaire.

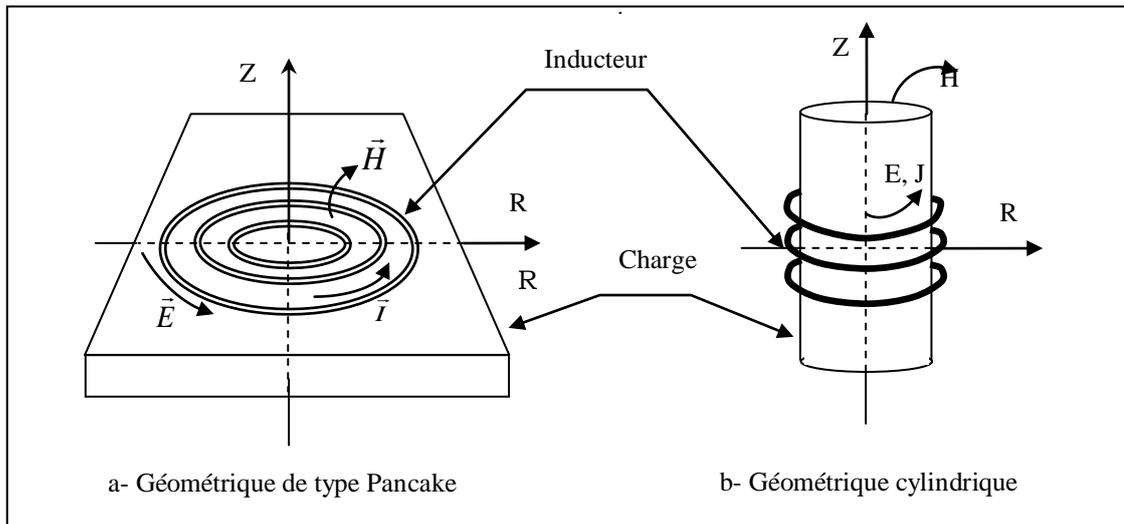


Figure II. 1 : Systèmes axisymétriques

Le potentiel se réduit à une seule composante suivant l'axe angulaire qui est appelé composante azimutale et ne dépend que de r et z où l'inconnue lui est perpendiculaire :

$$\begin{cases} \vec{A} = A_{\theta}(r, z) \vec{e}_{\theta} & \text{(a)} \\ \vec{J} = J_{\theta}(r, z) \vec{e}_{\theta} & \text{(b)} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Dans la suite de l'étude, nous considérons « A » et « J » comme étant des scalaires et sont donnés comme suit :

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \mathbf{A}_\theta & \text{(a)} \\ \mathbf{J} = J_\theta & \text{(b)} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

II.5.2- Equation de diffusion en 2D

Le calcul vectoriel en coordonnées cylindriques de l'équation de diffusion généralisée permet de réécrire cette équation sous la forme suivante :

$$\text{div}(\text{grad}\vec{A}) + \mu_0\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\mu_0\sigma \text{grad}V \quad (\text{II.17})$$

II.5.3- Gradient du potentiel scalaire électrique

L'expression générale du gradient de potentiel en coordonnées cylindriques est comme suite :

$$\text{grad}V(m) = \frac{\partial V}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{e}_\theta \quad (\text{II.18})$$

On sait bien que le courant électrique circule tout au long du périmètre moyen de la spire, par conséquent la composante radiale de potentiel électrique est nulle $\frac{\partial V}{\partial r} = 0$, alors l'expression (II.18) devient :

$$\text{grad}\vec{V}(m) = \frac{1}{r(p)} \frac{dV(p)}{d\theta} \vec{e}_\theta \quad (\text{II.19})$$

Par convention, le courant tout le long du périmètre moyen est le même alors le gradient du potentiel est constant. Posons $u(m)$ la tension appliquée aux bornes du contour (voir la figure II.3). Ce qui nous permet d'écrire :

$$\int_{u(p)}^0 dV(m) = \left(\text{grad}\vec{V}(n) \cdot \vec{e}_\theta \right) r(m) \int_0^{2\pi} d\theta = -2\pi r(m) \left(\text{grad}\vec{V} \cdot \vec{e}_\theta \right) \quad (\text{II.20})$$

A partir de cette expression on peut de déduire que la variation spatiale du potentiel électrique scalaire est exprimée en fonction de la tension appliquée ou induite $u(m)$ aux bornes de la spire et de ses caractéristiques géométriques :

$$\text{grad} \vec{V} \cdot \vec{e}_\theta = -\frac{u(m)}{2\pi r(m)} \quad (\text{II.21})$$

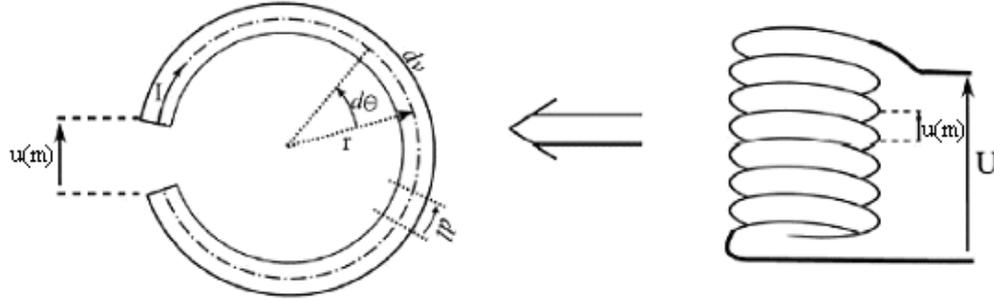


Figure II.3: Schéma d'une spire élémentaire

II.5.4- Expression du potentiel magnétique vecteur dans le vide

$$\begin{cases} \text{div}(\text{grad} \vec{A}(p)) = -\mu_0 J(q) & (\text{a}) \\ \frac{J(p)}{\sigma(p)} + \frac{dA(p)}{dt} + \text{grad} \vec{V}(p) \cdot \vec{e}_\theta = 0 & (\text{b}) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Pour résoudre le système d'équation (II.22), nous cherchons d'abord la solution de l'équation (II.22.a) qui sera injecté dans (II.22.b). C'est cette dernière qui formera le système d'équations à résoudre et par conséquent à définir le couplage des grandeurs électromagnétiques.

L'équation (II.22.a) est appelée équation de poisson vectoriel contrairement à l'appellation scalaire en électrostatique. Elle peut être résolue par transformation de Fourier, on montre qu'elle aboutit à l'expression de Biot et Savart du potentiel vecteur magnétique [13] :

$$A(p) = \frac{\mu_0}{2\pi} \iiint_{\tau} \frac{J(q) d\tau}{|\vec{op} - \vec{oq}|} \quad (\text{II.23})$$

Ce potentiel est en fonction des coordonnées des points « p » où on calcule le potentiel A(p), et « q » où est situé la densité de courant J(q) source

de ce potentiel. Ces deux points peuvent appartenir ou non au même domaine.

Le potentiel est calculé au point récepteur $p(r, z)$. Celui-ci est créé par une spire de section $s(q)$, de contour (C) , située au point « q » de coordonnées $(r(q), z(q))$ et parcourue par une intensité de courant $J(q) d\tau$.

On admet par approximation que le courant est constant dans la section de la spire (Figure II.2).

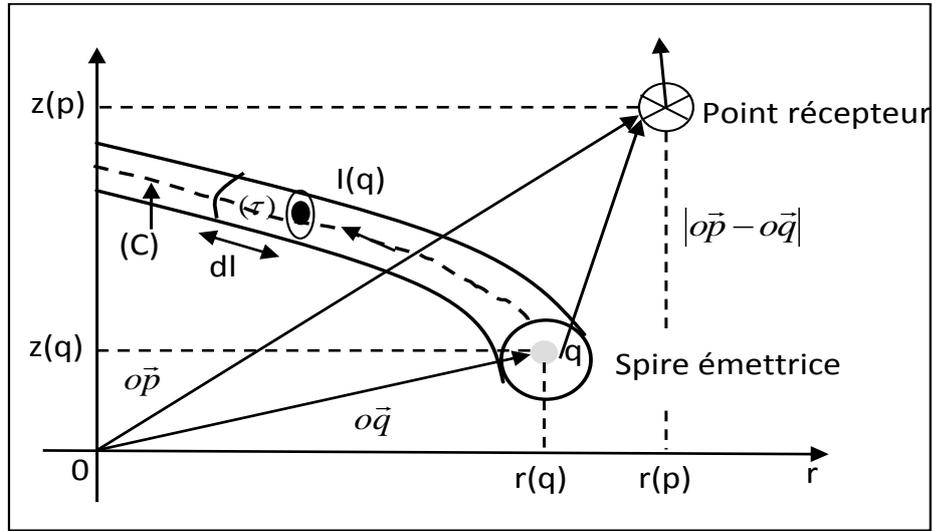


Figure II.2 : Représentation des spires élémentaires

$$\begin{cases} J(q) d\tau = I(q) dl & \text{(a)} \\ I(q) = J(q) s(q) & \text{(b)} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Le système est à symétrie de révolution. Le potentiel magnétique vecteur $A(m)$ n'a qu'une composante dirigée suivant « θ ». Le courant circule donc sur un contour (C) de rayon $r(n)$ et de longueur $l(n)$:

$$A(m, n) = A_\theta(m, n) \vec{e}_\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} I(n) \int_C \frac{d\vec{l}}{|\vec{om} - \vec{on}|} \quad (\text{II.25})$$

L'expression du potentiel en fonction des intégrales elliptiques est comme suite :

$$A(m) = \frac{\mu_0}{2\pi} G(m, n) I(n) \quad (\text{II.26})$$

Où :

$$\left\{ \begin{array}{l} G(m, n) = \sqrt{\frac{r(n)}{r(m)}} E[k(m, n)] \\ E[k(m, n)] = \frac{(2 - k^2) E_1(k) E_2(k)}{k} \\ k(m, n) = \sqrt{\frac{4r(m)r(n)}{(r(m) + r(n))^2 + (z(m) - z(n))^2}} \end{array} \right. \quad (\text{II.27})$$

$G(m, n)$ est le noyau de Green, représente les coordonnées des points émetteurs « n » et récepteurs « m ». $E_1(k)$ et $E_2(k)$ sont respectivement des fonctions elliptiques de première et seconde espèce de Legendre, $r(m)$ et $r(n)$ sont respectivement les rayons des points émetteurs et récepteur et $z(m)$ et $z(n)$ sont leurs hauteurs respectives [10].

3^{ème} CHAPITRE

III-Application de la méthode des circuits couplés

III.1- Modélisation des dispositifs axisymétriques

La méthode des circuits couplés permet de modéliser tout dispositif électromagnétique axisymétrique (ayant une symétrie axiale). Ce qui réduit l'étude à la moitié de domaine.

III.1.1- Equations électromagnétiques couplées

La formulation de cette méthode est basée sur les équations de Maxwell puis la simplification de ces équations donne un système de deux équations différentielles couplées. La première équation exprime le potentiel vecteur magnétique et la deuxième exprime la densité du courant.

L'effet électromagnétique d'un point « q », sur un point « p » de l'espace (Figure III.1), se formalise par les équations de Maxwell simplifiées suivantes.
[13]

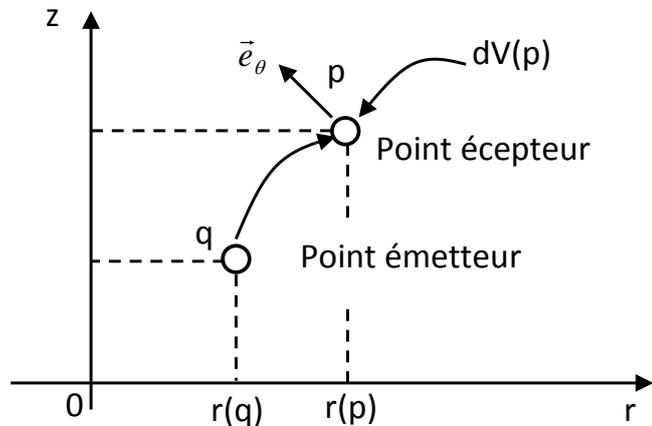


Figure III.1 : Effet mutuel entre deux points quelconque

L'équation (II.22.a) traduit que la densité $J(q)$ au point « q », est la source du potentiel vecteur $A(p,q)$ au point « p ». L'équation (II.22.b) définit le phénomène d'induction ; telle que la densité de courant $J(p)$ est induite sous la variation temporelle du potentiel magnétique $A(p,q)$ et spatiale du potentiel électrique $V(p)$. Autrement dit, la source de $A(p,q)$ est $J(q)$ et la

source de $J(p)$ est la variation temporelle de $A(p,q)$ et spatiale de $V(p)$. D'où le nom des « circuits couplés ».

III.1.2- Equation élémentaire du couplage des circuits électromagnétiques

On remplace l'expression (II.21) de potentiel vecteur magnétique et l'expression (II.27) de gradient du potentiel scalaire électrique dans l'équation (II.22.b), on trouve l'équation élémentaire du couplage des circuits électromagnétiques entre le point « m » récepteur et « n » point émetteur [13] :

$$\frac{2\pi r(p)}{\sigma(p)} J(p) + \mu_0 r(p) G(p,q) \frac{dI(q)}{dt} = u(p) \quad (III.1)$$

C'est l'équation ponctuelle des circuits électromagnétiques couplés. Elle exprime la création de la densité de courant $J(m)$ en un point « m » sous l'effet de la tension appliquée en ce point $u(m)$ et d'un potentiel magnétique vecteur crée par l'intensité de courant $I(n)$ située au point « n ».

Le même principe est appliqué pour le point « n ». Ainsi, on aboutit à l'équation précédente (III.1). La résolution simultanée des équations relatives aux points « m » et « n » permet de superposer des effets magnétiques et de définir le couplage électromagnétique entre deux points du système axisymétrique.

III.2- Application de l'équation intégrale généralisée pour la transmission d'énergie sans fil (couplage standard).

La transmission d'énergie sans fil se fait en présence deux bobines, l'une est mise sous tension U_e et parcourue par le courant électrique I_e , ce qui fait d'elle une source de champ électromagnétique, de section Ω_e .

Elle joue le rôle d'un émetteur. La seconde bobine est en circuit ouvert de courant induit nul et de tension induite U_r . Cette dernière est créée par le champ électromagnétique variable crée par l'émetteur (source) traversant la seconde bobine.

Elle est supposée réceptrice de section Ω_r . Supposant deux points : « p » point récepteur et « q » point émetteur de domaine Ω_e et deux autres points de domaine Ω_r « m » point émetteur et « n » point récepteur.

On note par les indices : « e » tous ce qui est relatif à l'émetteur et « r » tous ce qui est relatif au récepteur.

Dans ce qui suit, on va décrire l'effet mutuel de l'émetteur sur lui-même et sur le récepteur (sachant que l'effet mutuel de récepteur sur lui-même et sur l'émetteur est nul) par des formulations intégrales des équations. [14]

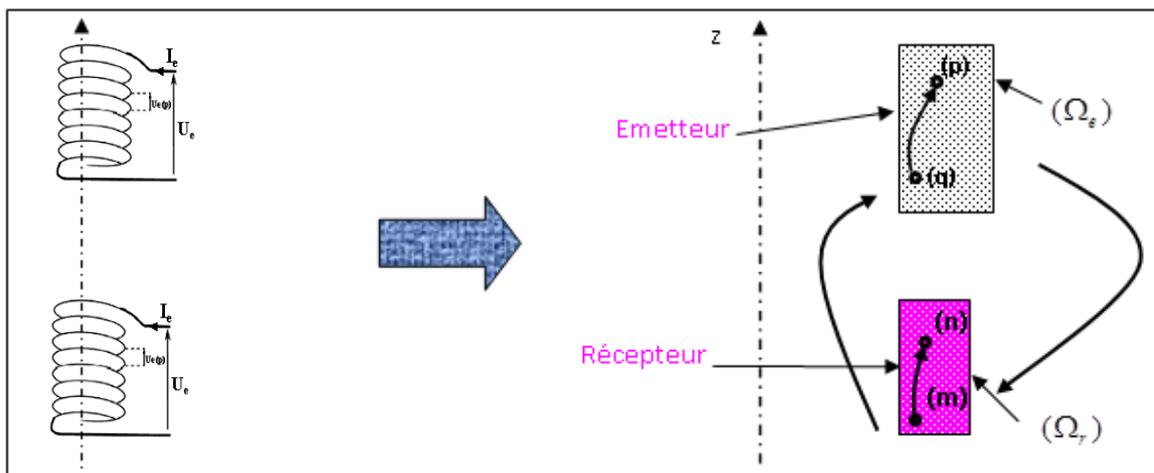


Figure III.3 : Représentation graphique de dispositif de couplage

III.2.1- Formulation intégrale de l'équation relative à l'émetteur

La figure III.3 est représentée dans un repère en coordonnées cylindriques. L'émetteur est la source de champ électromagnétique, occupe un domaine d'étude Ω_e et sa conductivité est σ . L'équation (III.2) représente l'influence électromagnétique de l'émetteur sur un élément de même domaine :

$$\frac{2\pi r_e(p)}{\sigma_e(p)} J_e(p) + j\mu_0 \omega r_e(p) \left[\iint_{\Omega_e} G_{ee}(p,q) J_e(q) d\Omega_e \right] = u_e(p) \quad (III.2)$$

$G_e(p, q)$ Est le noyau de Green associé au système et qui représente la mutualité entre les deux éléments de Ω_e . $r_e(p)$, $J_e(p)$ et $u_e(p)$ sont respectivement le rayon, la densité de courant et la tension de $p^{\text{ième}}$ élément relative à l'émetteur.

III.2.2- Discrétisation des domaines d'étude

Dans ce cas, on procède à la discrétisation des domaines continus d'étude, composés de :

Domaine de l'émetteur et de récepteur. Le domaine Ω_e représente la coupe de la bobine émettrice, subdivisé en « N_e » éléments disposés en série. Ces derniers représentent les spires élémentaires liées à l'émetteur. Le domaine Ω_r représente la coupe de la bobine réceptrice, subdivisé en « N_r » éléments disposés en série mais en circuit ouvert [14].

Ces derniers représentent les spires élémentaires liées au récepteur. Pour modéliser le couplage électromagnétique de ces deux domaines, il suffit tout simplement de discrétiser les équations exprimées ci-dessus par la méthode de formulation intégrale [13].

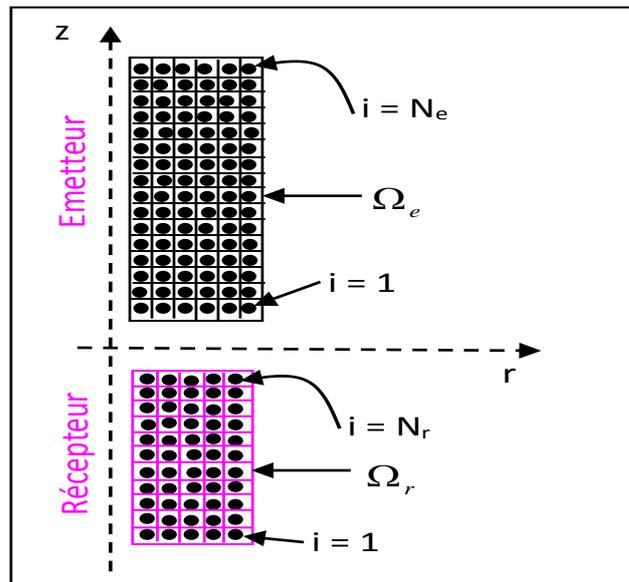


Figure III.4 : Discrétisation de dispositif de couplage

III.2.3- Discrétisation de l'émetteur

Pour établir l'équation du couplage des circuits électromagnétiques relative à l'émetteur, on procède à la discrétisation de l'équation intégrale (III.7). Etant donné « p » point récepteur (spire) et « i » variable qui représentent le point émetteur. L'équation (III.6) exprime l'influence mutuelle de tous les points émetteurs (bobine) sur un seul point récepteur :

$$\frac{2\pi r_e(p)}{\sigma(m)S(p)} i(p) + j\mu_0\omega r_e(p) \left(\sum_{i=1}^{N_e} G_{ee}(p,i) I_e(i) \right) = u_e(p) \quad (III.3)$$

$G_{ee}(p, i)$ et $r_e(p)$ représentent respectivement la fonction des coordonnées des spires élémentaires liées à l'émetteur et le rayon de la spire élémentaire liée à l'émetteur.

III.2.4- Discrétisation du récepteur

Il suffit de discrétiser l'équation intégrale (II.27). Etant donné « n » le point récepteur (spire) et « i » variable qui représente le point émetteur, l'équation (III.4) exprime aussi les effets globaux de tous les points de l'émetteur sur un seul point de récepteur :

$$j\mu_0\omega r_r(n) \left(\sum_{i=1}^{N_e} G_{re}(n,i) I_e(i) \right) = u_r(n) \quad (III.4)$$

$G_{re}(n, i)$ et $r_r(n)$ représentent respectivement la fonction des coordonnées des spires élémentaires entre le récepteur et l'émetteur et rayon de la spire élémentaire liée au récepteur.

III.3- Calcul de la tension totale

La tension totale à vide de l'émetteur U_e peut être calculée par l'équation (III.5) en considérant que les spires de l'émetteur sont en série alors le courant de l'émetteur est constant, c'est-à-dire : $I_e = I_e(1) = \dots = I_e(p) = \dots = I_e(N_e)$

$$U_e = \sum_{p=1}^{N_e} u_e(p) \quad (III.5)$$

On remplace l'équation (III.3) dans (III.5), on abouti à l'équation de la tension totale, cas à vide, de l'émetteur :

$$U_e = \sum_{p=1}^{N_e} \left(\frac{2\pi r_e(p)}{\sigma_e s_e(p)} I_e(p) + j\mu_0 \omega r_e(p) I_e \left(\sum_{i=1}^{N_e} G_{ee}(p,i) \right) \right) \quad (III.6)$$

En tenant compte que les spires de récepteur qui sont en série, la tension induite totale, cas à vide, de récepteur est donné dans l'équation (III.9). Sachant que le courant induit de la bobine est nul, c'est-à-dire : $I_r = I_r(1) = \dots = I_r(l) = \dots = I_r(N_r) = 0$

$$U_r = \sum_{n=1}^{N_r} u_r(n) \quad (III.7)$$

En remplaçant l'équation (III.4) dans (III.7), on abouti à l'équation de la tension totale à vide de récepteur :

$$U_r = \sum_{n=1}^{N_r} \left(j\mu_0 \omega r_r(n) I_e \left(\sum_{i=1}^{N_s} G_{re}(n,i) \right) \right) \quad (III.8)$$

On constitue à partir des équations (III.6) et (III.8) un système d'équations à résoudre de (02) équations avec de (02) inconnus afin de trouver la valeur de U_r :

$$\begin{cases} \sum_{p=1}^{N_e} \left(\frac{2\pi r_e(p)}{\sigma_e s_e(p)} I_e + j\mu_0 \omega r_e(p) \left(I_e \sum_{i=1}^{N_e} G_{ee}(p,i) \right) \right) = U_e \\ \sum_{n=1}^{N_r} \left(j\mu_0 \omega r_r(n) \left(I_e \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^{N_e} G_{re}(n,i) \right) \right) = U_r \end{cases} \quad (III.9)$$

U_e et U_r sont respectivement la tension appliquée à l'émetteur (connue) et celle de sortie du récepteur (inconnue) et I_e est le courant de l'émetteur (inconnue).

III.4- Application et résultats

La géométrie étudiée est composée d'un émetteur et d'un récepteur dont le bobinage est identique et constitué de 10 spires (Figure III.5).

La figure III.6 montre l'allure de la tension en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur et pour différentes valeurs de la fréquence. Nous remarquons évidemment que la tension de sortie diminue avec l'augmentation de cette distance

La figure III.7 donne l'allure de la tension en fonction de la fréquence et pour différentes valeurs de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Nous constatons que cette tension augmente rapidement avec la fréquence jusqu'à l'apparition d'un phénomène de saturation.

Dans la figure III.8, la tension augmente faiblement avec le rayon des bobinages jusqu'à l'apparition d'un phénomène de saturation.

La figure III.9 représente l'allure de la tension de sortie en fonction du rayon interne pour différente valeur de la distance entre l'émetteur et le récepteur, nous constatons que cette tension diminue avec l'augmentation de cette distance.

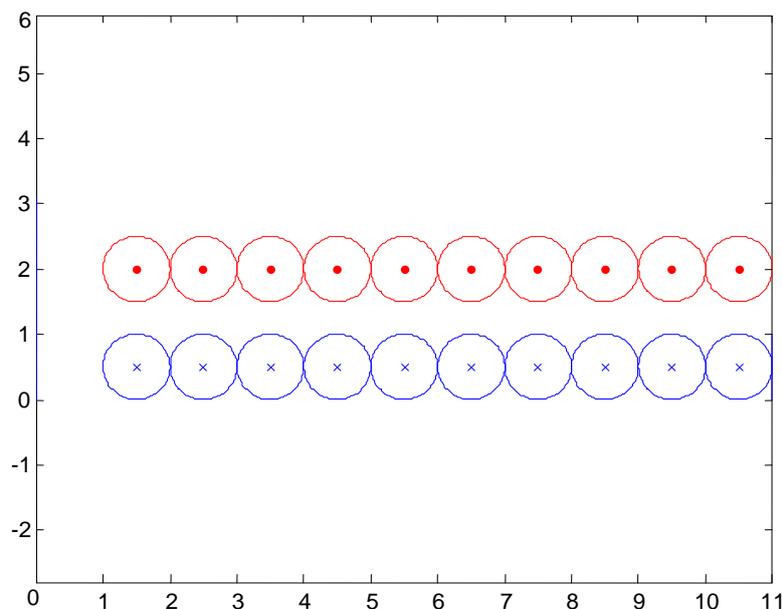


Figure III.5 : Modèle géométrique

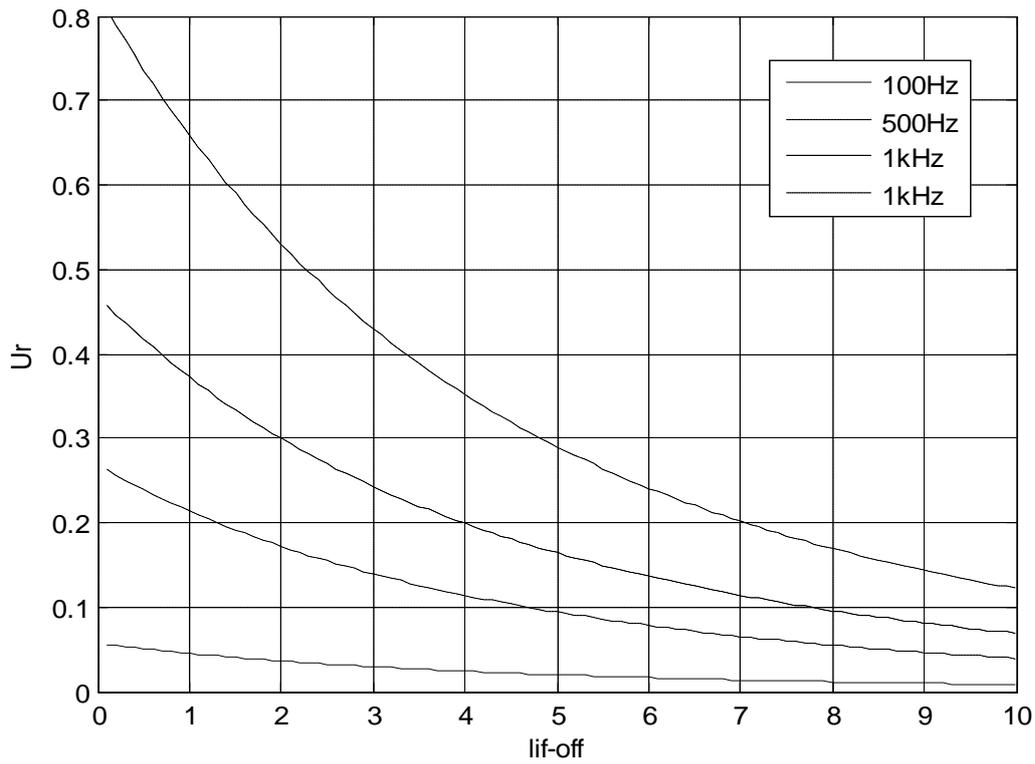


Figure III.6 : Tension de sortie en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur pour différente fréquence

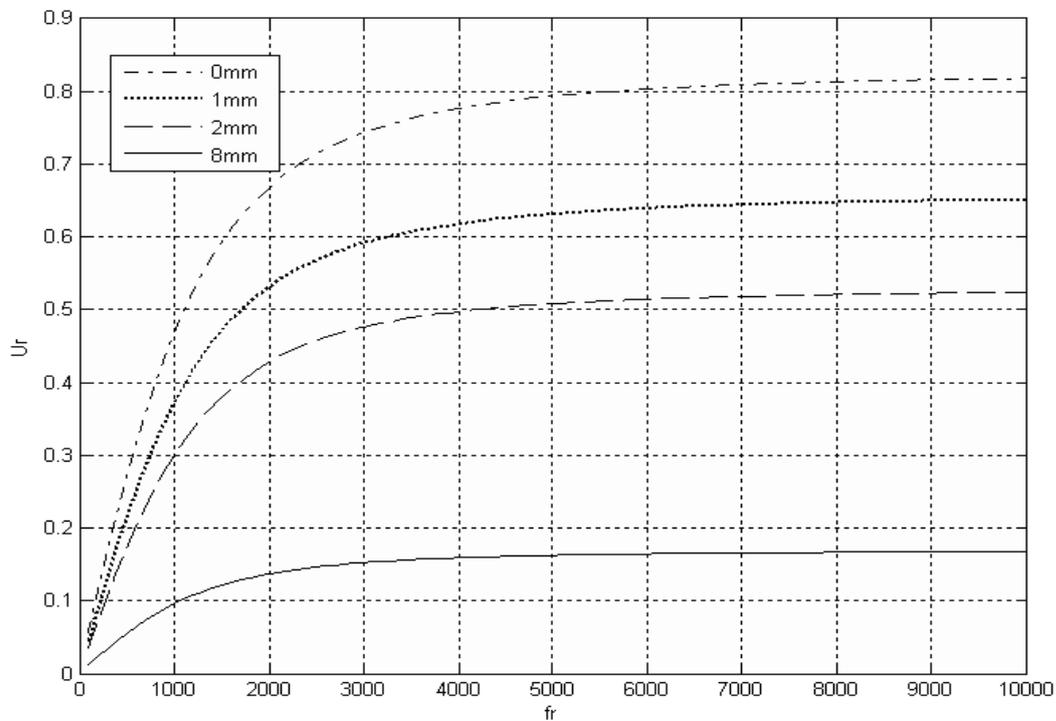


Figure III.7 : Tension de sortie en fonction de la fréquence pour différente distance entre l'émetteur et le récepteur

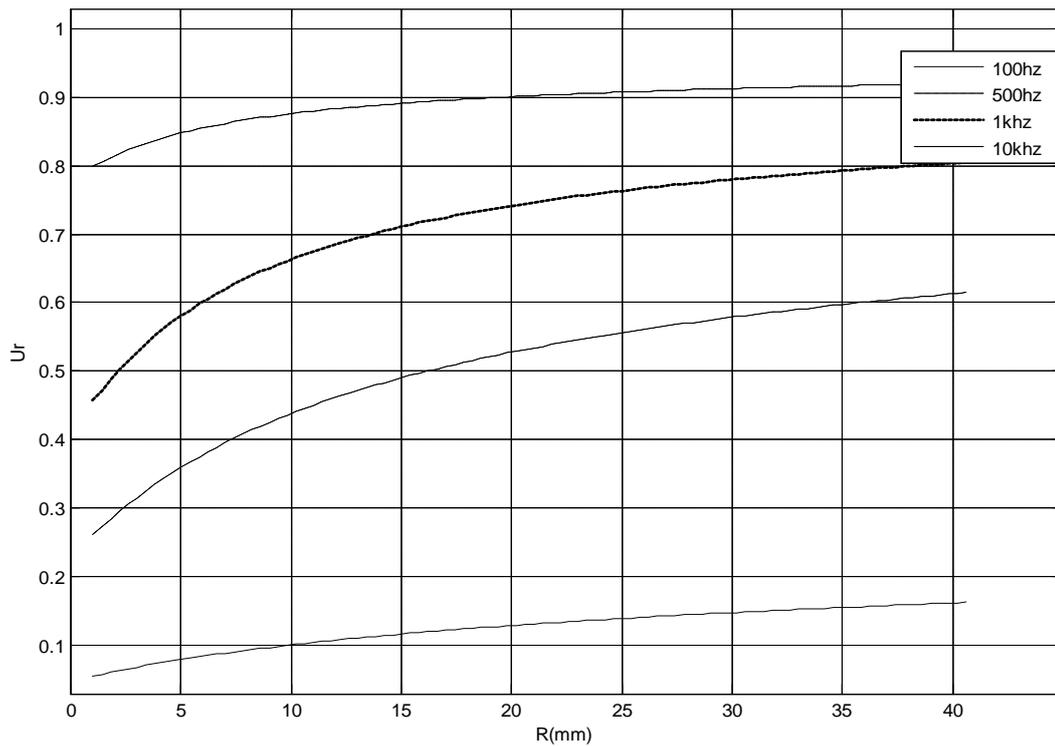


Figure III.8 : Tension de sortie en fonction du rayon interne pour différente valeur de la fréquence

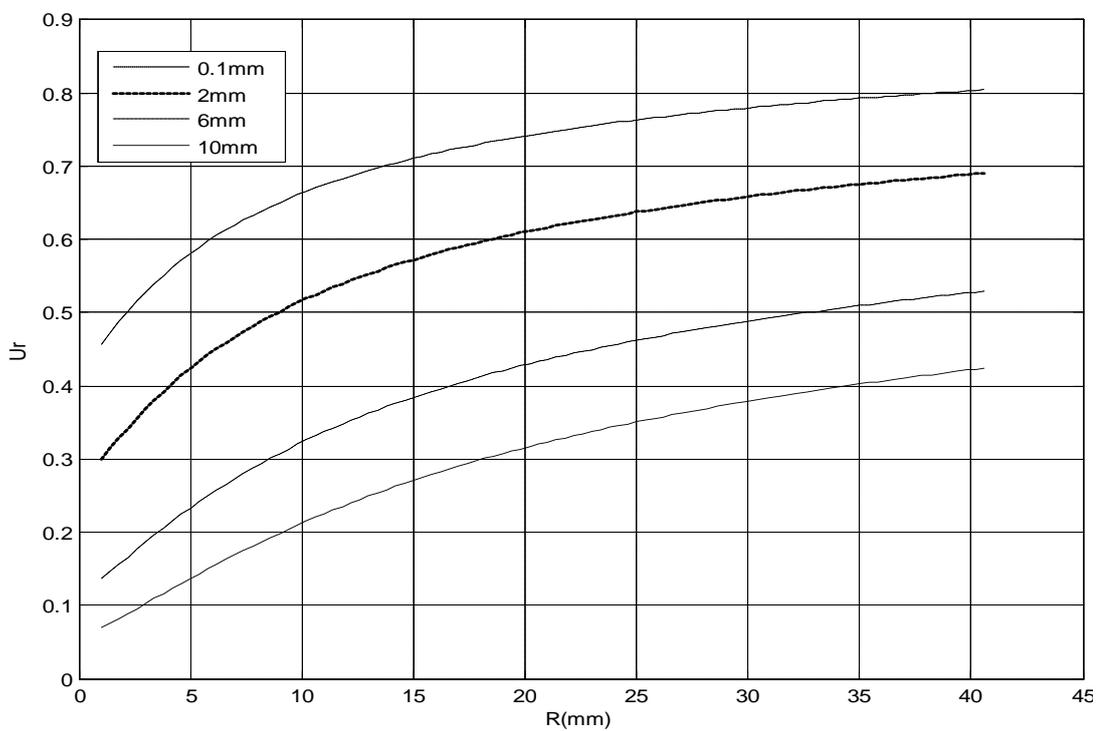


Figure III.9 : Tension de sortie en fonction du rayon interne pour différente valeur de la distance entre l'émetteur et le récepteur

CONCLUSION GENERALE

La transmission d'énergie électrique sans fil se révèle être un moyen de transmission innovateur et efficace, tout en étant en symbiose avec l'environnement. En convertissant l'énergie électrique en onde électromagnétique, on peut ainsi la transporter sans utiliser de câbles conducteurs. Combiné à d'autres technologies comme la résonance, le transport sans fil peut se faire à grande distance et par conséquent, elle serait la solution idéale pour pallier aux problèmes de crises énergétique et environnemental actuelle.

Au cours de ce projet, nous avons étudié le transport d'énergie sans fil en présentant ses différentes applications, ainsi que les méthodes de calcul basées sur le modèle général et axisymétrique de Maxwell et le principe du transformateur.

Nous avons développé un outil de calcul sous Matlab basé sur un modèle mathématique issu de la méthode des circuits électrique couplés. Nous avons limité l'étude au cas de transmission d'énergie où le récepteur est à vide. Nous avons étudié la tension de sortie en fonction de différents paramètres tels que la distance entre l'émetteur et le récepteur, le rayon du bobinage et la fréquence d'alimentation.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que la tension de sortie est fortement dépendante des caractéristiques géométriques et de la fréquence. Pour un rendement optimal, il faut que la distance entre les bobinages soit la plus faible possible, une fréquence au début du phénomène de saturation et un rayon relativement important.

En perspective, pour prolonger la distance de transfert, un couplage inductif résonant est nécessaire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] avenir et science, « le miracle de l'électricité sans fil », Caressou Sébastien, Démettre Oliver et Severin Guillaume. édition 2007.
www.science-sainte-rose.net/.../Avenir_et_Sciences_TESF.pdf.2016/03/25
- [2] Livre « Electricité bases et application »www.ecoinfo.cnrs.fr Octobre 2011 consulter le 25/3/2016.
- [3] L'ELECTRICITE SANS IL. « Comment peut-on transmettre du courant d'un point A à un point B sans utiliser de fil entre les deux ».Pauline BEGUIN. Mariette MARANT.
- [4] Article «Etude des bobines couplées et transmission d'énergie à distance sous conditions de résonance». François Mussaute, Ken Krieger, Ali Farah Université de Bordeaux 1,
- [5] Livre « TRANSFORMATEURS, Cours et Problèmes » Claude CHEVASSU, Edition septembre 2014.
- [6] Article «Couplage électromagnétique» Alexandre Boyer .boyer@insa-toulouse.fr Septembre 2012(arqs)
- [7] Livre «Cours de Physique appliquée » Terminale STI Génie Electrotechnique © Fabrice Sincère ; édition 1.0.6.
- [8] Revue «LE TRANSFORMATEUR», Bapio BAYALA Professeur technique .Edition 2010.
- [9] Livre Amari Mansour, «Technologue en Génie électrique» édition Janvier 2014.
- [10] Vlad MARIAN «Transmission d'_énergie sans _fil : Application au réveil _distance de récepteurs en veille zéro consommation»Thèse de l'Université de Lyon 2012.

- [11] YAHIOU Abdelghani, « Contribution à l'étude et à l'analyse du régime transitoire dans les transformateurs de puissance : Cas du courant d'appel » Mémoire de magister, université de Ferhat Abbas Sétif.
- [12] Article «THÉORIE ÉLECTROMAGNÉTIQUE DE MAXWELL. Induction électromagnétique.» Jean Le Hir, octobre 2008.
- [13] Abdelkrim AMIRA « Modélisation du contrôle non destructif par courants de Foucault. Application à un dispositif de capteur à fonctions séparées » UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA.
- [14] Mémoire de Fin d'étude, « « caractérisation non destructive par courant de Foucault pulsés d'une rainure par inversion associé à méthode des circuits électriques couplé » » Titouahlounis et Ziane Abdeslam. université Abderrahmane Mira Bejaïa. 2013/2014.
- [15] Mémoire de magistère, « « Modélisation des phénomènes électromagnétiques non linéaires par la méthode des volumes finis » ».par Maioufi Atika le 20/04/2006.