



UNIVERSITÉ DE M'SILA
FACULTÉ DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGÉNIOIRAT
DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
D'INGÉNIEUR D'ÉTAT EN GÉNIE ÉLECTROTÉCHNIQUE

OPTION: COMMANDE ELECTRIQUE

THÈME

**DETERMINATION DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE
DES MATERIAUX COMPOSITES RENFORCIE ENFIBRE DE
CARBONNE PAR LA METHODE D'IMPEDANCE**

Proposé et dirigé par :

➤ M^r. Samir BENSAID

Présenté par :

Laid BOUAFIA

Fouaz LAMINE

Année Universitaire : 2008 / 2009



REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous tenons à remercier vivement notre encadreur **Dr S-BENSAID** pour les orientations et les conseils judicieux qu'il n'a cessé de nous prodiguer. Ce dernier nous a été d'un grand soutien tout au long de l'élaboration de ce travail.

Egalement un grand merci à nos enseignants qui tout au long de notre scolarité n'ont ménagé ni leur temps ni leurs efforts contribuant de la manière la plus efficace à notre formation.

Que le chef du département d'Electrotechnique monsieur **Bachir BENDJAÏMA** trouve ici l'expression de notre gratitude et de nos remerciements les plus chaleureux pour tout le soutien qu'il nous a apporté.

Nous n'oublierons pas tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin durant notre étude.

Table des matières

Introduction générale..... 4

Chapitre I Conductivité électrique et matériaux composites

I-1 Introduction 7

I-2 Conductivité électrique 7

 I-2-1 Définition 7

 I-2-2 Principe physique..... 7

 I-2-3 Unité de mesure de la conductivité électrique 10

I-3 Méthodes de mesure de la conductivité électrique 10

 I-3-1 Méthodes volt ampérométriques 11

 I-3-2 Méthode des courants induits 13

I-4 Les matériaux composites 14

 I-4-1 Définition d'un matériau composite 14

 I-4-2 Constituants des matériaux composites 14

 I-4-2-1 La matrice 15

 I-4-2-2 Le renfort 16

 I-4-3 Architecture du composite 19

 I-4-3-1 Les monocouches 19

 I-4-3-2 Les stratifiées 20

 I-4-3-3 Les sandwichs 22

 I-4-4 Avantages des matériaux composites : 22

I-4-5 Inconvénients des matériaux composites :	23
I-5 Mesure de la conductivité des matériaux composites	23
I-5-1 Application des méthodes avec contact sur les matériaux composites	23
I-5-2 Application des méthodes sans contact sur les matériaux composites	24
I-6 Conclusion	26

Chapitre II Modélisation du système de mesure

II-1 Introduction	27
II-2 Système de mesure de la conductivité	27
II-2-1 Influence des constituants	27
II-2-2 Influence de la géométrie	28
II-3 Identification de la conductivité à partir de l'impédance	29
II-4 problème inverse	31
II-5 Formulation dans systèmes électromagnétiques	33
II-5-1 Equations de Maxwell	33
II-5-2 Relations constitutives	34
II-5-3 Conditions de passage	34
II-5-4 Quelques écritures simplifiées des équations	35
II-5-5 Formulation du problème	36
II-6 formulation du problème direct par une méthode analytique	37
II-7 Conclusion	41

Chapitre III Méthodes de mesure de l'impédance et cas validation de la méthode proposée

III-1 Introduction	42
III-2 Quelques résultats de simulation	42
III-3 Méthodes de Mesures de l'impédance	44
III-3-1 Oscillation libre :	44
III-3-2 Pont de Maxwell	47
III-3-3 La méthode de résonances parallèle	48
III-4 Validation de la méthode	50
III-4-1 Résultats de mesure de la résistance :	51
III-4-2 Résultats d'identification de la conductivité du cuivre :	55
III-5 Résultats d'identification de la conductivité du cuivre :	56
III-6 Conclusion	57
Conclusion générale.....	58
Références bibliographiques.....	59

Introduction générale

Les matériaux composites associent matière plastique et renfort en fibres, généralement de verre ou de carbone, leurs propriétés, notamment de légèreté ou de résistance. Ces avantages leur ont ouvert des marchés importants dans la construction automobile, l'aéronautique, ou encore le bâtiment comme le montre la figure 0.

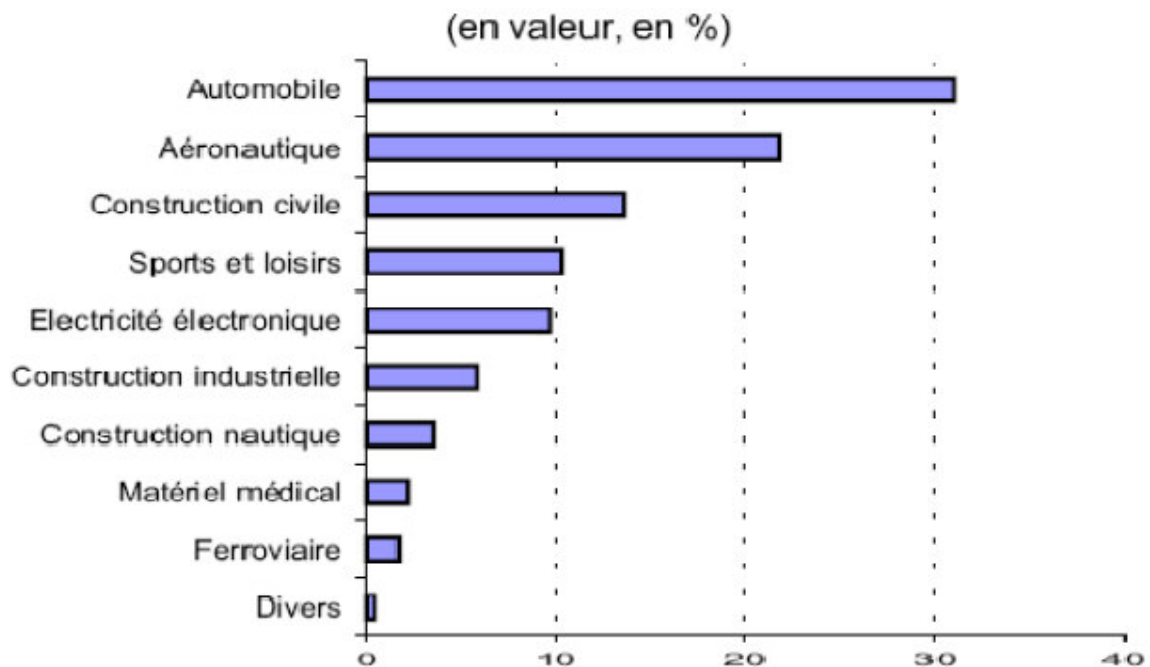


Figure 0 : Evolution du pourcentage d'utilisateurs des matériaux composites [10]

L'objectif des producteurs des matériaux composites est de concurrencer et de surpasser les métaux qui, de leur côté, ne cessent d'optimiser leurs propres caractéristiques. La diversité des matériaux composites et leur souplesse, qui permet de fabriquer ou de composer des caractéristiques à la carte, rendent cet

objectif légitime. Il est pourtant loin d'être atteint parce qu'à l'heure actuelle la production des matériaux composites ne représente que 2% celle des métaux [3].

Le contrôle de la santé et la transformation en produits finaux des matériaux composites sont à la fois des problèmes technologique et scientifique. En effet, la réalisation et l'utilisation de ces matériaux font intervenir les différents domaines de la science tels que la chimie, la mécanique, la thermique ou l'électromagnétisme.

Dans le but d'étudier ces matériaux en vue du contrôle de leur santé et de leur transformation, nous devons chercher le modèle le plus simple à cet effet. On sait que ces matériaux sont hétérogènes et anisotropes, il est donc important lors de l'étude de ces matériaux de les remplacer par des matériaux homogènes de propriétés équivalentes. La recherche de ces propriétés équivalentes est plus au moins complexe, c'est ce qu'on appelle couramment l'homogénéisation.

Dans le contrôle non destructif par courants de Foucault et le chauffage par induction de ces matériaux nécessitent une homogénéisation électromagnétique et thermique. Cela peut se faire par des méthodes multi-échelles [11], ou bien par des méthodes expérimentales. Dans notre projet nous allons utiliser une méthode d'homogénéisation expérimentale pour rechercher la conductivité équivalente des matériaux composites.

Ce projet est découpé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous présenterons de façon générale la conductivité électrique et les méthodes de mesure appliquées aux matériaux conventionnels.

Puis nous donnerons un aperçu sur les matériaux composites et leurs caractéristiques principales. Nous verrons également comment est la conductivité électrique de ces matériaux et quelle méthode pourrait être appliquée sur ces matériaux avec une meilleure précision.

Dans le deuxième chapitre nous allons présenter une technique d'identification de la conductivité électrique que nous avons proposée. Celle-ci se compose de deux parties, une partie qui se repose sur l'outil informatique et mathématique qui est la partie modélisation et résolution du problème électromagnétique. Une deuxième partie qui se repose sur des essais expérimentaux. Cette dernière sera présentée dans le chapitre III. La technique proposée consiste à calculer la résistance d'un système bobine plaque (bobinage au tour d'une plaque conductrice) à l'aide d'un modèle électromagnétique de ce système, et à mesurer la résistance de ce système puis les comparer jusqu'à remonter à la conductivité électrique de la plaque conductrice par le biais d'une méthode d'inversion (problème inverse).

Dans le chapitre trois nous présenterons les méthodes de mesures de la résistance (impédance). Nous avons validé la technique proposée sur un matériau homogène et isotrope de conductivité connue. Les résultats d'identification de la conductivité de ce matériau seront présentés à la fin de ce chapitre.

On termine par une conclusion et perspectives.

I-1 Introduction :

Le choix des matériaux électrique que l'on utilise dans les installations ou pour la fabrication électrique se fait essentiellement au vu de leurs propriétés électriques, par exemple la conductivité électrique.

Dans ce chapitre nous exposerons les différentes méthodes existantes de mesure de la conductivité électrique, puis nous parlerons des matériaux composites et enfin nous verrons quelles méthodes pouvant être appliquées aux composites conducteurs.

I-2 Conductivité électrique

I-2-1 Définition

La conductivité électrique est l'aptitude d'un matériau à laisser les charges électriques de se déplacer librement, autrement dit, à permettre le passage du courant électrique.

La conductivité électrique est l'inverse de la résistivité électrique. Elle correspond à la conductance d'une portion de matériau de (m) de longueur et de (m^2) de section.

Un bon conducteur d'électricité c'est le matériau qui cause une faible chute de tension dans le circuit où il est utilisé. Et un mauvais conducteur est celui qui cause une importante chute de tension.

I-2-2 Principe physique

a) Matériau conducteur en circuit ouvert

Lorsque le conducteur métallique n'est soumis à aucune tension (absence de générateur), les électrons de conduction sont en mouvement désordonné.

b) Matériau conducteur soumis à une différence de potentiel

Lorsque le conducteur métallique est soumis à une tension électrique (générateur relié au conducteur), les électrons de conduction se déplacent tous dans le même sens : de la borne négative du générateur vers sa borne positive.

Dans les métaux, les porteurs de charges mobiles sont les électrons. Chaque atome d'un métal possède au moins un électron peu lié au noyau, appelé électron libre ou électron de conduction, il peut se déplacer d'un atome à un autre.

Un métal est électriquement neutre (absence de charge électrique globale). La conductivité d'un métal est mesurée habituellement par un conductimètre ou par mesure directe par une méthode voltampère métrique. Cette dernière est la méthode des 4 fils sur une éprouvette allongée de section S constante que l'on alimente en courant I par ses extrémités, la chute de tension V est mesurée dans sa partie deux points distants d'une longueur L .

Tableau I-1 résistivité de quelques matériaux (1)

Elément	Résistivité à 25 °c		Conductivité à 25 °c
	$\Omega \text{ m } 10^{-8}$		
Argent	1,617		0,618
Cuivre	1,712		0,584
Or	2,255		0,443
Aluminium	2,709		0,369
Tungstène	5,39		0,186
Zinc	6,01		0,166
Fer	9,87		0,101
Laiton	6,29		0,159
Bronze	13,6		0,074
Acier au carbone	17		0,059
Constatant	49		0,020
Acier inox	55		0,018
Acier 18/8	66,3		0,015
Nichrome	107,3		0,009
Graphite	1000		0,001

I-2-3 Unité de mesure de la conductivité électrique

L'unité de la conductivité électrique dans le Système international d'unités (SI) est le siemens par mètre. C'est le rapport de la densité de courant par l'intensité du champ électrique. C'est l'inverse de celle de la résistivité.

Le symbole généralement utilisé pour désigner la conductivité électrique est la lettre grecque *sigma* : σ .

Selon les matériaux, σ varie de $10^8 (Sm^{-1})$ à $10^{-22} Sm^{-1}$..

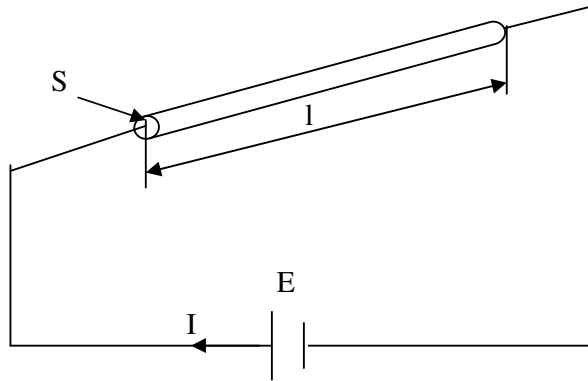


Figure I. 1 Représentation du matériau conducteur

Pour un matériau de longueur l , de section S et de résistance R ($R=E/I$).

$$\sigma = \frac{1}{R} \frac{l}{S} (SI) \tag{I-1}$$

I-3 Méthodes de mesure de la conductivité électrique

Dans le cas des matériaux conventionnels, plusieurs méthodes sont utilisées pour la mesure de la conductivité électrique. Ces méthodes peuvent être classées selon qu'il y ait ou non un contact physique entre le système de mesure et le matériau.

Dans les méthodes avec contact, on trouve les méthodes volt-ampérométriques. Celles sans contact sont basées sur le phénomène des courants induits. Par exemple, la mesure de la variation de l'impédance d'une bobine inductrice, sans et avec présence de l'échantillon, permet de remonter à la conductivité électrique du matériau.

I-3-1 Méthodes volt ampérométriques

La conductivité du matériau peut être obtenue par la mesure de la résistance et des dimensions géométriques d'un échantillon de ce matériau. Pour cela, deux méthodes sont utilisées, la mesure à deux points et la mesure à quatre points

Dans la méthode à deux points, la mesure se fait seulement avec deux contacts.

L'échantillon, qui est caractérisé par sa résistance électrique et ses dimensions géométriques, est soumis à une tension électrique. L'ensemble constitue une boucle fermée où circule un courant mesuré par l'ampèremètre Figure I.2.

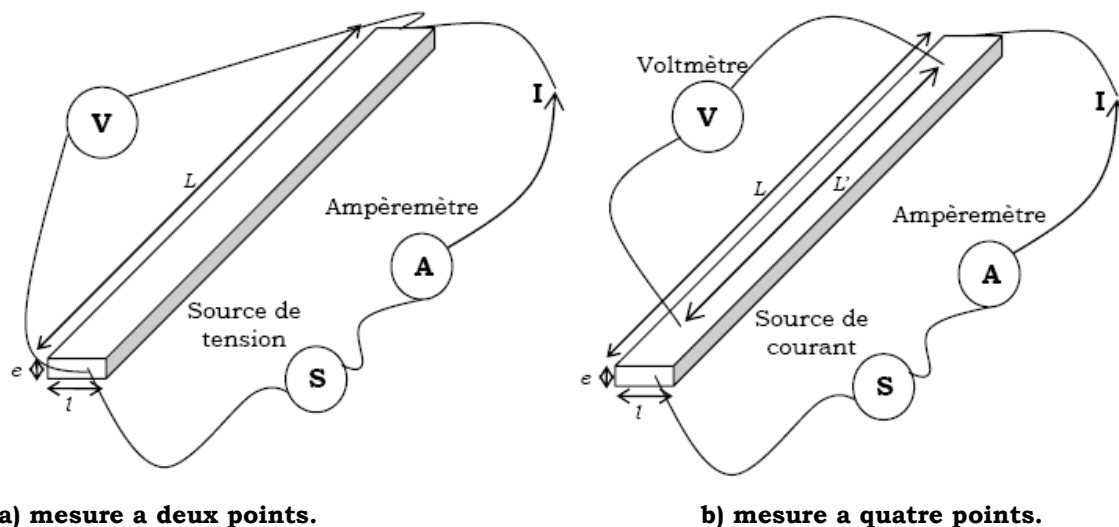


Figure I. 2 Mesure volt ampérométrique

La conductivité électrique est donnée en $(\Omega^{-1} \cdot m^{-1})$ ou en (S/m) par l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{I \cdot L}{V \cdot S} \quad (I-2)$$

Avec, $S = e \cdot l$ la section de passage du courant.

En pratique, plusieurs sources d'erreurs sont à considérer au cours de la mesure de conductivité par la méthode à deux points. La première est la résistance non négligeable des contacts, qui provient à la fois de la résistance du matériau utilisé pour la réalisation des contacts, et de la non uniformité des contacts dans la section de passage du courant. L'évaluation de la résistance de contact est une opération très délicate. La deuxième source d'erreurs provient des résistances internes des appareils de mesure. Toutes ces erreurs viennent s'additionner à la résistance mesurée, et la conductivité obtenue sera sous évaluée. La mesure des dimensions géométriques de l'échantillon constitue aussi une source non négligeable d'erreur.

Pour diminuer l'influence de ces sources d'erreurs, il faut:

- Prendre une longueur (L) plus grande et une section (s) plus faible pour avoir une résistance importante, et réduire ainsi les incertitudes de mesure,
- Utiliser des contacts réalisés avec des matériaux très bons conducteurs,
- Exercer une pression suffisante pour maintenir les contacts sur la surface.

La méthode à quatre points est une solution qui permet de réduire encore plus ces sources d'erreurs. Cette méthode nécessite quatre contacts, deux pour l'alimentation de l'échantillon et la mesure du courant, et deux pour la mesure de la tension Figure I.2.

La conductivité est obtenue par la même formule que (I-1), mais en remplaçant la longueur (L) de l'échantillon par la distance (L') entre les deux contacts de mesure de la tension :

$$\sigma = \frac{I \cdot L'}{V \cdot S} \quad (I-3)$$

I-3-2 Méthode des courants induits

La mesure de la conductivité électrique avec la méthode des courants induits repose sur le même principe que la méthode du contrôle non destructif par courants de Foucault. Celle-ci est basée sur l'induction de courants dans des matériaux conducteurs dus au champ inducteur d'une bobine inductrice appelée capteur. La réponse (impédance) de ce dernier, dépend des différentes caractéristiques dont la conductivité électrique du matériau contrôlé.

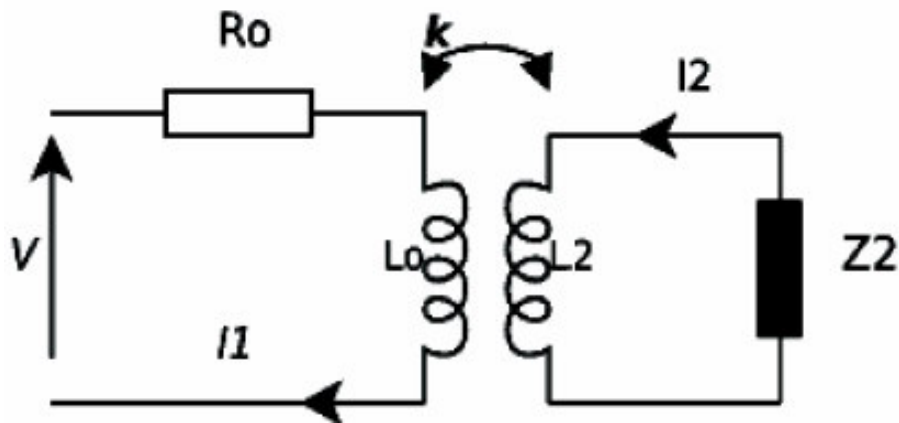


Figure I. 3 Circuit équivalent du système capteur chargé (5)

Le schéma électrique équivalent de l'ensemble capteur et matériau contrôlé est généralement confondu à un transformateur qui débite sur une charge Z_2 Figure I.3.

L'impédance mesurée associée à un modèle de calcul permet de remonter à la conductivité électrique.

I-4 Les matériaux composites

I-4-1 Définition d'un matériau composite

On appelle de façon courante "matériau composite" un arrangement de fibres (renforts) qui sont noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces. Les matériaux ainsi obtenus sont fortement hétérogènes et anisotrope.

I-4-2 Constituants des matériaux composites

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites, des charges et adjuvants.
- D'un renfort Figure I.4.

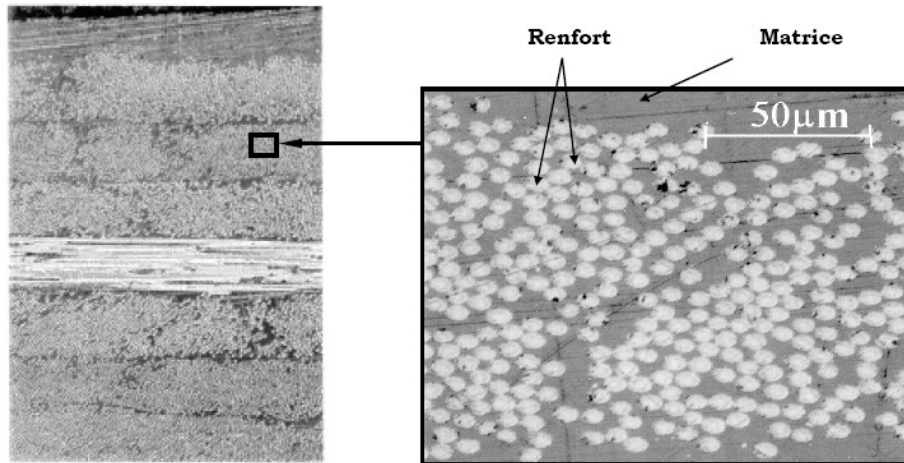


Figure I. 4 Image agrandie vue de l'épaisseur d'un matériau composite renforcé en fibre de carbone

Les propriétés physiques d'un matériau composite dépendent directement de ses différents constituants. L'imprécision sur l'orientation et la position des fibres, par exemple, lors de la fabrication du composite, augmentera les incertitudes dans l'estimation de ses propriétés physiques.

I-4-2-1 La matrice

La matrice permet de lier les fibres du renfort entre elles, et de répartir les efforts mécaniques (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres. Généralement, c'est un polymère ou une résine organique.

Les matrices les plus employées dans les matériaux composites sont les polymères thermodurcissables et les polymères thermoplastiques.

Les matrices thermodurcissables sont des polymères qui, après un traitement thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces polymères ont la particularité de ne pouvoir être mis en forme qu'une seule fois.

Les matrices thermodurcissables (TD) ont toujours contenu des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60 % en masse, ce qui n'est pas le cas des matrices thermoplastiques (TP). Ces charges sont généralement, sous forme d'éléments fragmentaires, en poudres

ou liquide. Celles-ci permettent de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques, magnétiques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau résultant.

Les matrices thermoplastiques, en revanche, peuvent être alternativement ramollies par chauffage et durcies par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. De plus, ces polymères présentent l'aptitude à l'état liquide de se mouler facilement par plasticité.

Les matériaux composites à matrice thermoplastique peuvent être donc assemblés ou recyclés par fusion. Ce qui n'est pas le cas pour les matériaux composites à matrice thermodurcissable qui sont de nature infusible. Dans le cas de la fusion, il est indispensable de connaître la température de fusion de la matrice thermoplastique [6].

I-4-2-2 Le renfort

Le renfort constitue l'armature ou le squelette, assurant la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Il est par définition de nature fibreux ou filamentaire. Le diamètre des fibres est d'environ 5 à 15µm. Ce sont les renforts qui apportent l'essentiel des propriétés mécaniques d'un matériau composite. Ils sont le plus souvent d'origine organique (par exemple aramide) ou minérale (carbone, verre, bore, carbure de silicium).

On distingue différentes présentations :

- Des éléments linéaires constitués de filaments continus ou non, destinés à des opérations textiles ou dans l'état,
- Des éléments surfaciques (tissus, nappes, tresses),
- Des éléments multidirectionnels (tissage multidirectionnel) permettant de disposer les fibres suivant les trois directions dans l'espace et non plus dans le plan.

Les structures de renfort

Le renfort peut se présenter suivant deux structures distinctes:

- ✓ Les structures aléatoires.
- ✓ Les structures orientées.

La structure du renfort est l'élément le plus déterminant du degré d'anisotropie du matériau composite.

1) Les structures aléatoires Figure I.5

Les structures aléatoires sont réalisées à partir de fibres coupées ou broyées. Ces fibres sont dispersées de façon aléatoire et maintenues par un liant soluble afin d'obtenir un mat à fibres courtes. Ce type de renfort est utilisé lorsqu'on recherche une bonne résistance à la compression.

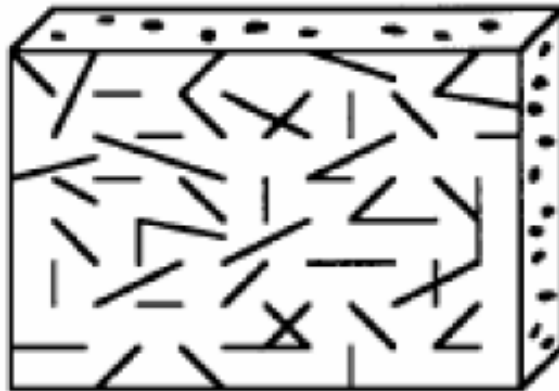


Figure I. 5 structures aléatoires

2) Les structures orientées

Les structures orientées se divisent en deux catégories :

a) Les structures unidirectionnelles (UD)

Dans ces structures, les fibres sont orientées dans une même direction qui sera la direction principale de contrainte FigureI.6. Certaines propriétés physiques, telles que les conductivités électrique et thermique, d'un pli unidirectionnel sont plus grandes dans un sens que dans l'autre.

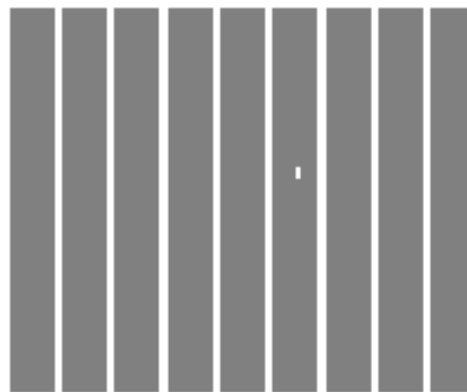


Figure I. 6 Structure unidirectionnelle (nappe)

b) Les structures tissées

Elles sont généralement obtenues par tissage (bi ou tri directionnel) ou par superposition de nappes unidirectionnelles. Les tissus diffèrent par le mode d'entrecroisement des fibres appelé armure. On distingue le satin, le serge et le taffetas, FigureI.7.

Le satin est surtout employé lorsqu'on souhaite obtenir une grande résistance mécanique, le taffetas et la serge est les plus couramment utilisées.

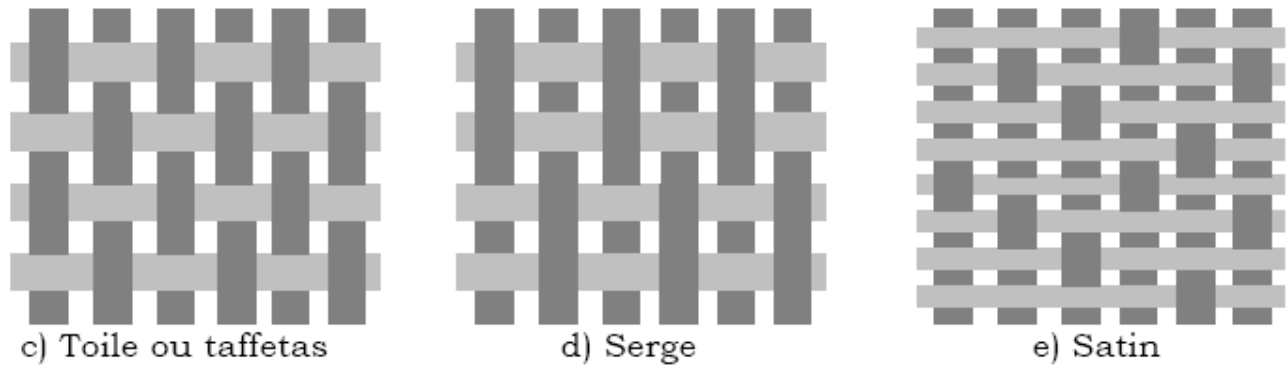


Figure I.7 Mode d'entrecroisement des fibres [5]

Il est également possible de réaliser des structures de renforts hybrides en des fibres de natures différentes ou, en superposant des tissus ou nappes renforts de fibres différentes.

I-4-3 Architecture du composite

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwiches

I-4-3-1 Les monocouches

La composite monocouche (couche élémentaire ou strate) correspond à l'unit élémentaire d'épaisseur, elle est constituée d'un ou plusieurs plis identiques (tissé, UD, mats,...) assemblés sans aucune orientation. Un pli est un semi produit de composites (fibres+matrice) présenté sous forme quasi-bidimensionnelle, feuille d'épaisseur faible (≈ 0.125 mm). On distingue, le pli UD (Le renfort est à structure UD), le pli tissé (Le renfort est à structure orienté) et le pli mat (Le renfort est à structure aléatoire).

La superposition de la monocouche dans l'ordre du plan de drapage va constituer le stratifié Figure (I_8).[6]

I-4-3-2 Les stratifiées

Le composite stratifié ou multicouche est un ensemble de couches empilées et orientées suivant un ordre de drapage défini et rendues solidaires par l'opération de polymérisation.

Le drapage c'est l'orientation des plis par rapport à un référentiel donné. Il définit les propriétés mécaniques, électromagnétiques et thermiques globales du matériau composite. La figure (I-9)[5] montre un exemple de plan de drapage d'un stratifié.

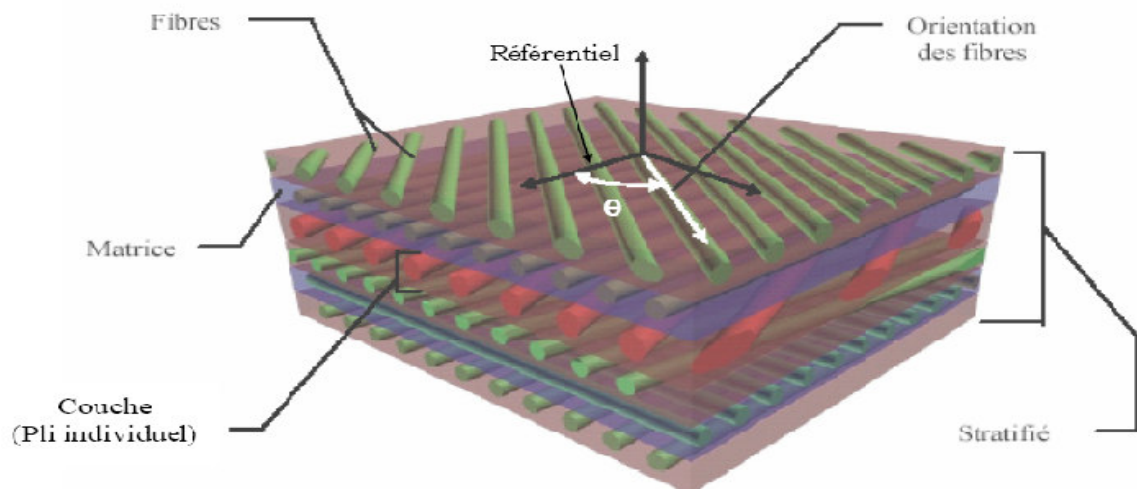


Figure I.8 Composite stratifiée

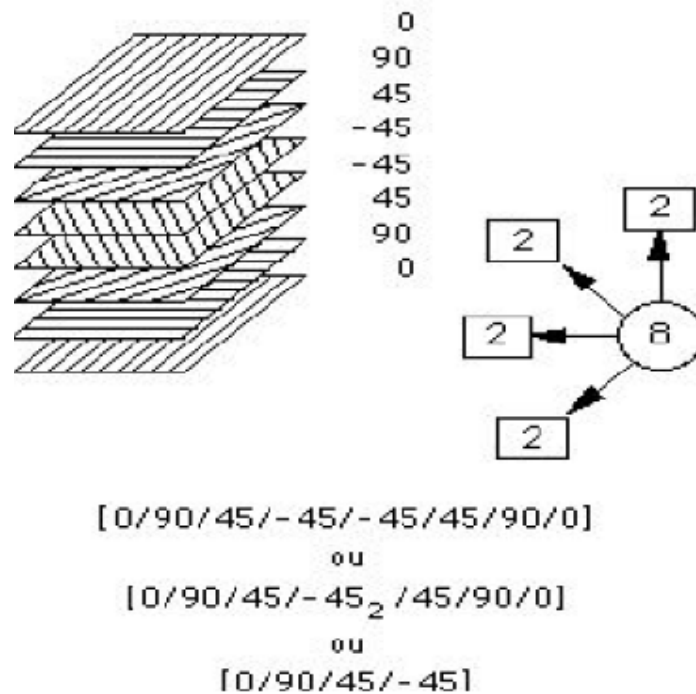


Figure I.9 Exemple du Plan du drapage d'un composite stratifié

Les stratifiés peuvent être de trois types :

- 1) Équilibrés** : le stratifié contient autant de couches orientées suivant la direction $+\theta$ que de couches suivant la direction $-\theta$.
- 2) symétriques** : les couches du stratifié sont disposées symétriquement par rapport à un plan moyen (miroir).
- 3) orthogonaux** : le stratifié comporte autant de couches à 0° que de couches à 90° .

Lorsque la symétrie miroir est réalisée, elle entraîne la symétrie des contraintes et empêche ainsi l'apparition des déformations d'ensembles de la pièce (voilement, gauchissement)

L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure[6].

I-4-3-3 Les sandwichs

Les sandwichs sont des matériaux possédant deux peaux de grande rigidité et de faible épaisseur renfermant un cœur (âme) de forte épaisseur et de faible résistance Figure I.10. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une bonne résistance à la flexion et est un excellent isolant thermique.

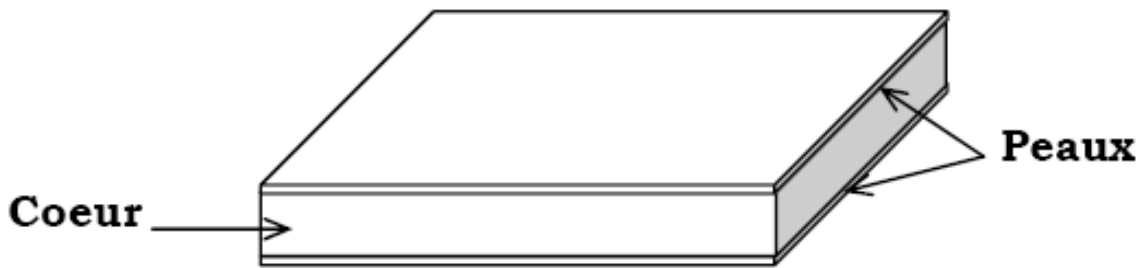


Figure I.10 Composites sandwichs

I-4-4 Avantages des matériaux composites :

Les matériaux composites présentent plusieurs avantages comparés aux matériaux conventionnels :

- Gain de masse
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques).
- Grande résistance à la fatigue.
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf en cas de contact entre de l'aluminium et des fibres de carbone).
- Insensibles aux produits chimiques "mécaniques " comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole.

I-4-5 Inconvénients des matériaux composites

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température.
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes.
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques.
- Meilleure tenue au feu (classement M) que les alliages légers mais émission de fumées (classement F) parfois toxiques pour certaines matrices.
- Coût parfois prohibitifs (temps et coût études et mise en œuvre), le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries.

I-5 Mesure de la conductivité des matériaux composites

La conductivité électrique d'un matériau composite renforcé en fibre de carbone dépend de plusieurs paramètres. Parmi ces paramètres :

- ✓ le taux de remplissage en fibres de carbone.
- ✓ l'orientation des fibres dans le pli.
- ✓ le drapage du composite.
- ✓ la structure du renfort.

I-5-1 Application des méthodes avec contact sur les matériaux composites

Appliquer les méthodes volt ampérométrique au cas des matériaux composites stratifiés, est encore plus complexe. En effet, ces matériaux sont sous forme d'un empilage de plusieurs couches fines orientées dans le plan oxy suivant un ordre défini. Chaque couche est constituée d'un renfort en fibres de carbone noyées dans une matrice résineuse. Deux problèmes principaux sont alors rencontrés lors de l'application des méthodes volt Ampérométrique[3].

- **La difficulté de mise sous tension de toutes les fibres de carbone**

Certes l'ampèremètre mesure un courant, mais il n'est pas certain que ce dernier parcourt l'ensemble des fibres se trouvant entre les deux contacts

électriques. Dans ce cas, l'application directe de la formule I.1 ou I.2 ne donnera pas de résultats précis.

- **La difficulté de prendre en compte l'orientation des plis (couches)**

Dans ce cas la zone effective de passage du courant diminue fortement comme le montre la figure (I.11)

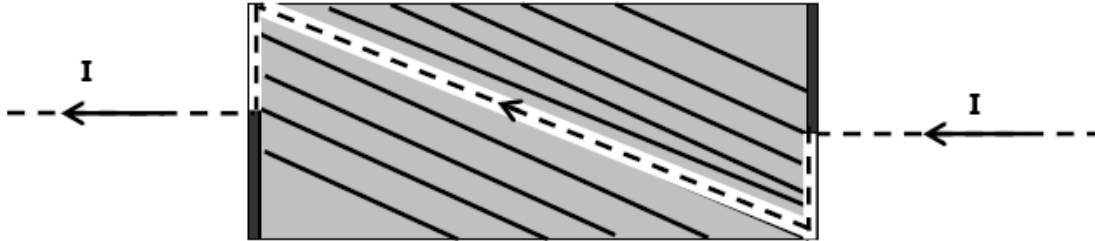


Figure I.11 Passage du courant dans un pli du composite stratifié

Pour contourner cette difficulté, il faut mesurer la conductivité électrique d'un pli de composite non imprégné. À travers cette solution, le pourcentage des fibres qui sont mises sous tension est amélioré.

I-5-2 Application des méthodes sans contact sur les matériaux composites

a- Méthode des courants induits

L'intérêt principal de cette méthode est l'absence de contact entre la source et le matériau. Son principe basé sur les courants induits nous place dans le même environnement que celui du chauffage par induction électromagnétique et du contrôle non destructif par courants de Foucault (CF), ce qui fait un autre point fort de cette méthode par rapport aux différentes applications.

b- Autres méthodes

La méthode des courants induits a été associée à une méthode de mesure thermique et un modèle couplé électromagnétique thermique pour remonter à la conductivité électrique des matériaux composites à partir de la mesure de la température.

La figure I.12 décrit les principales étapes de cette méthode. Cette procédure est une méthode sans contact.

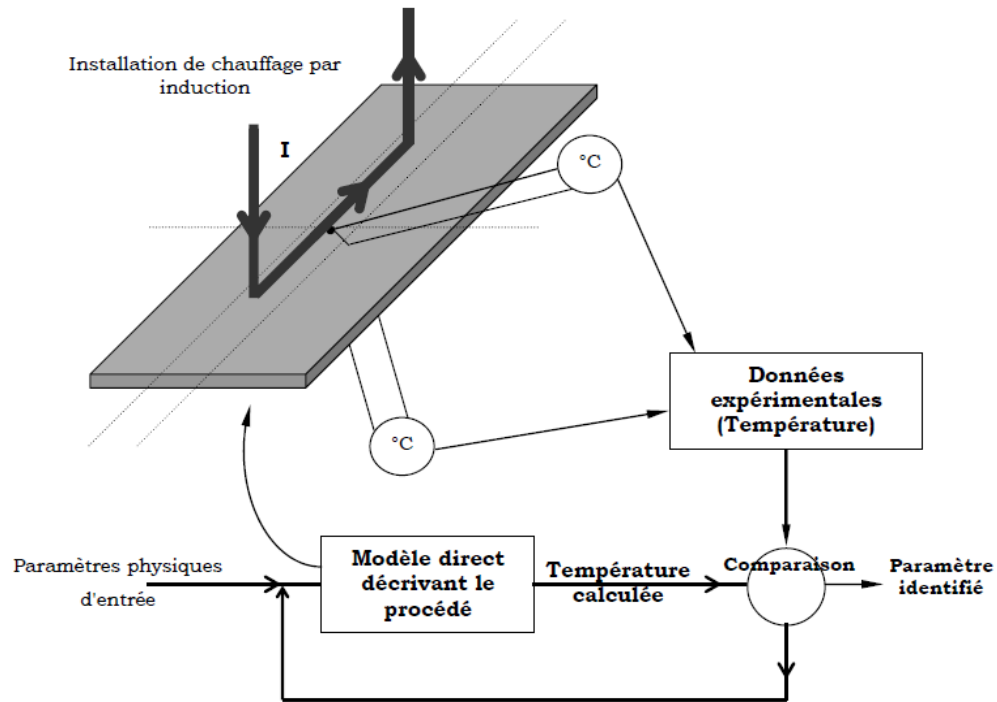


Figure I.12 Identification de la conductivité électrique par mesure de température [3]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les méthodes de mesure de la conductivité électrique appliquées aux matériaux métalliques (homogène et isotrope), puis nous avons parlé des matériaux composites, de leurs constituants et de leurs structures. Nous avons vu que ces matériaux sont hétérogènes et anisotropes. Donc à l'échelle microscopique le matériau possède des propriétés physiques différentes d'une zone à une autre et d'une direction à l'autre. Les méthodes de mesure de la conductivité électrique appliquées à ces matériaux sont exposées à la fin de ce chapitre, et nous avons conclu que la méthode la plus adéquate à ces matériaux est la méthode des courants induits.

II-1 Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons choisi la méthode des courants induits pour la mesure de la conductivité des matériaux composites conducteurs. Celle-ci, comparée aux autres méthodes, a le point fort de se placer dans les mêmes conditions que le CND par CF et le chauffage par induction électromagnétique de ces matériaux.

Dans ce chapitre, nous présenterons un système (bobine plaque) de mesure de la conductivité électrique que nous avons proposé. Ce système sera étudié à l'aide d'un modèle analytique obtenu à partir des équations de Maxwell et des conditions aux limites associées. Ce modèle permet le calcul de l'impédance du système (bobine plaque). Cette impédance sera comparée à celle obtenue à partir des mesures jusqu'à obtention de la conductivité électrique de la plaque en composite ou autre matériau conducteur. Cette technique est appelée couramment « méthode du problème inverse ».

II-2 Système de mesure de la conductivité

II-2-1 Influence des constituants

La conductivité électrique équivalente d'un matériau composite dépend directement de la conductivité de ses différents constituants. Quand le matériau composite est renforcé en fibres de carbone, la conductivité dépend de la nature des fibres utilisées, du taux de remplissage en fibres et de la géométrie du renfort.

Le Tableau (II.1) donne quelques ordres de grandeur de la conductivité électrique Pour différentes fibres de carbone [3].

Fibre de carbone		Précurseur	Type	Conductivité électrique ($\Omega \cdot m$) ⁻¹
Torayca	T300	PAN	HR	$5,56 \times 10^4$
Torayca	M 40	PAN	HM	$1,25 \times 10^5$
Thormel	P 55-S	Brai	HM	$1,43 \times 10^5$
Thormel	P 75-S	Brai	HM	$2,00 \times 10^5$
Thormel	P 100-S	Brai	THM	$4,00 \times 10^5$

Tableau II. 1 Conductivité électrique des fibres de carbone.

Globalement la conductivité électrique des fibres de carbone est de 102 à 103 fois inférieure à celle des métaux et dépend de son procédé d'élaboration.

II-2-2 Influence de la géométrie

Le taux de remplissage du renfort est généralement inférieur à 70 %, la conductivité électrique équivalente du matériau composite ne peut alors être supérieure au deux tiers de la conductivité de la fibre de carbone constituant ce matériau (dans le cas d'une matrice isolante). De plus, l'architecture du renfort peut faire diminuer de moitié la conductivité électrique équivalente.

La figure II.1 présente un exemple d'architecture du renfort et d'orientation des plis d'un matériau composite.

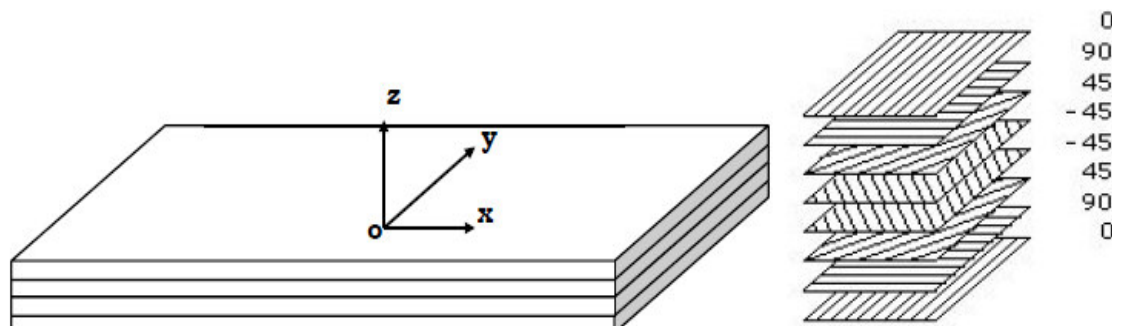


Figure II. 1 Repérage des composantes du tenseur de propriétés

La conductivité électrique des matériaux composites est généralement anisotrope, son expression mathématique s'écrit sous forme tensorielle. Elle est donnée par σ .

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{II-1})$$

Dans le cadre des matériaux composites la méthode de mesure de la conductivité électrique doit répondre aux exigences suivantes :

- Permettre la mesure de la conductivité électrique dans les différentes directions (composante du tenseur).
- donner des erreurs de mesure très faibles.

Généralement, dans les matériaux composites stratifiés sont interposés des films isolants entre les plis, la conductivité électrique est alors très faible dans le sens de l'épaisseur z . Par conséquent, il ne reste plus qu'à déterminer les composantes selon le plan xy et le tenseur s'écrit alors :

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-2})$$

II-3 Identification de la conductivité à partir de l'impédance

Cette méthode consiste à bobiner autour d'une plaque conductrice (matériau à Identifier) des fils de cuivre. L'ensemble forme alors une bobine à noyau ayant comme circuit électrique équivalent une résistance R et une inductance L en série (Figure II.2)[4]. La connaissance des valeurs de R et L nous permet de remonter à la conductivité électrique de la plaque.

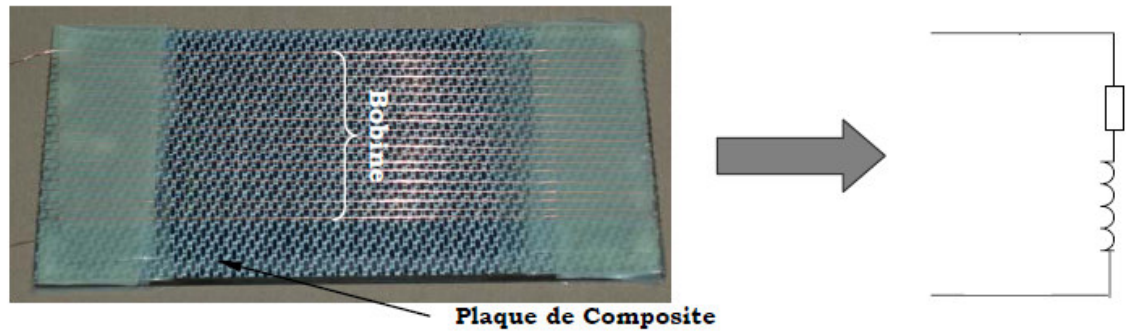


Figure II.2 Système de mesure de la conductivité électrique et circuit équivalent

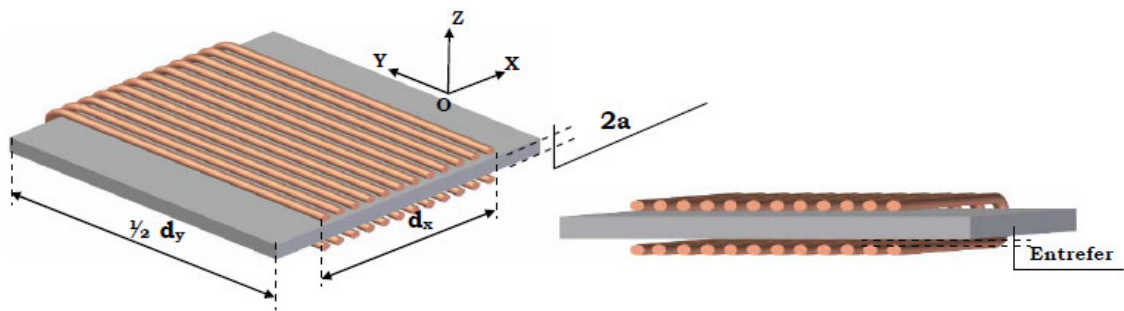


Figure II. 3 Représentation géométrique du système de mesure

Pour remonter à la conductivité électrique, la méthode du problème inverse sera utilisée.

La composante du tenseur de conductivité qui sera identifiée avec la méthode que nous avons choisi d'utiliser (méthode analytique) est la composante suivant les fils conducteurs (σ_y).

II-4 problème inverse

La (figureII.4) décrit l'algorithme d'identification de la conductivité électrique par la méthode du problème inverse.

A partir d'une valeur initiale de la conductivité et de la connaissance du modèle direct, on calcule l'impédance de l'ensemble plaque/bobine. Cette valeur est ensuite comparée à l'impédance mesurée par une méthode appropriée. Si l'erreur entre ces deux valeurs est supérieure à une certaine tolérance, la valeur de la conductivité est alors modifiée jusqu'à la convergence de l'algorithme. Pour améliorer la vitesse de convergence on choisira de préférence comme valeur initiale de la conductivité, celle issue de la phase d'homogénéisation prédictive.

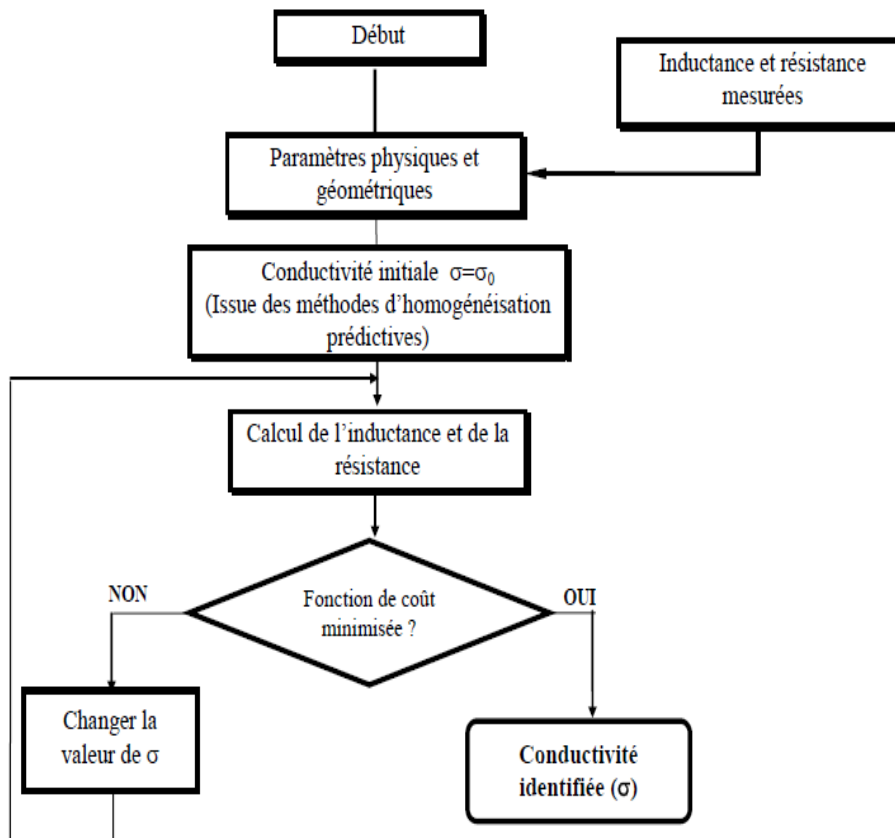


Figure II.4 Algorithme d'identification de σ par le problème inverse

La fonction coût U est construite sur la base des moindres carrés. Selon la géométrie et la nature du matériau on peut choisir un critère s'appuyant sur :

1 - La résistance

$$U(\sigma) = \frac{1}{2} \left(\frac{R_m - R_c}{R_m} \right)^2 \quad (\text{II-3})$$

2-L'inductance

$$U(\sigma) = \frac{1}{2} \left(\frac{L_m - L_{cm}}{L_m} \right)^2 \quad (\text{II-4})$$

3-L'impédance

$$U(\sigma) = \frac{1}{2} \left(\frac{L_m - L_{cm}}{L_m} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{R_m - R_c}{R_m} \right)^2 \quad (\text{II-5})$$

On peu utiliser une méthode d'optimisation pour minimiser la fonction objective, comme par exemple la méthode des simplex de Nelder-Mead.

Mais comme nous allons utilisé une méthode analytique pour modéliser notre système, nous pouvons utilisé une méthode d'interpolation linéaire sans passer par la minimiser de la fonction objectif, qui permet de calculer la résistance et l'inductance en fonction de produit fréquence conductivité.

Pour être plus claire, l'identification de la conductivité électrique d'un matériau conducteur à l'aide de la méthode proposée fait appel à un banc de mesure expérimentale qui permet la mesure de l'impédance et à une station de calcul (PC) qui permet le calcul de l'impédance et la comparaison de celle-ci avec celle mesurée. La station de calcul permet donc la résolution d'une équation aux dérivées partielles afin de calculer l'impédance. Cette équation est obtenue par combinaison des équations de Maxwell.

II-5 Formulation dans systèmes électromagnétiques

Le calcul de l'impédance passe par la résolution du problème direct défini par l'équation aux dérivées partielles représentant le système, qui est obtenue à partir des équations de Maxwell [2].

II-5-1 Equations de Maxwell

Les phénomènes électromagnétiques variables dans le temps et dans l'espace sont régis par les quatre équations générales locales de Maxwell:

$$\vec{\text{rot}}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II-6})$$

$$\vec{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II-7})$$

$$\vec{\text{div}}\vec{D} = \rho \quad (\text{II-8})$$

$$\vec{\text{div}}\vec{B} = 0 \quad (\text{II-9})$$

Avec :

\vec{H} : Champ magnétique [A/m]

\vec{E} : Champ électrique [V/m]

\vec{B} : Induction magnétique [T]

\vec{D} : Induction électrique [C/m²]

\vec{J} : Densité du courant [A/m²]

ρ : Densité volumique des charges électriques [C/m³]

Les lois Maxwell Ampère (II.6) et Maxwell Faraday (II.7) expriment le couplage entre les grandeurs électriques et magnétiques.

II-5-2 Relations constitutives

Les équations précédentes sont associées aux relations constitutives (lois de comportements) des matériaux. Le comportement magnétique est exprimé par la relation suivante:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (\text{II-10})$$

Avec,

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (\text{II-11})$$

Où μ_0 est la perméabilité du vide et μ_r est la perméabilité relative du milieu qui peut dépendre ou non de H.

En l'absence de déplacement des charges, la forme locale de la loi d'Ohm s'écrit:

$$\vec{J} = [\sigma] \vec{E} + [\varepsilon] \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{II-12})$$

De l'équation (II-7) et (II-9) on peut déduire que la densité de courant est à flux conservatif :

$$\vec{\text{div}} \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{II-13})$$

II-5-3 Conditions de passage

Lors du passage d'un milieu 1 à un milieu 2, les grandeurs de champs subissent des discontinuités et, ne sont pas différentiables. Les relations entre

les grandeurs électromagnétiques à l'interface, dites relations de transmission, s'écrivent alors :

$$(\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) \cdot \mathbf{n} = \rho_s \quad (\text{II-14})$$

$$(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (\text{II-15})$$

$$(\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) \cdot \mathbf{n} = \mathbf{J}_s \quad (\text{II-16})$$

$$(\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (\text{II-17})$$

Avec (ρ_s) la densité surfacique de charge, (\mathbf{J}_s) la densité surfacique de courant et \mathbf{n} le vecteur unitaire normal dirigé vers l'extérieur du milieu 1.

II.5.4 Quelques écritures simplifiées des équations

Dans le cadre de notre travail, quelques simplifications sont possibles sur les lois de comportement. Les charges volumiques sont négligées ($\rho = 0$),

(II-11) devient alors :

$$\vec{\text{div}} \mathbf{J} = 0 \quad (\text{II-18})$$

De plus, si les composantes de champs \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{B} et de courants \mathbf{J} ont une dépendance sinusoïdale du temps, tel que :

$$X = X(r) e^{i\omega t} \quad (\text{II-19})$$

La dérivée par rapport au temps sera remplacée par l'équation (II-13) devient alors :

$$\mathbf{J} = ([\sigma] + j\omega[\epsilon]) \cdot \mathbf{E} \quad (\text{II-20})$$

Pour simplifier l'écriture nous intégrons le terme $j\omega[\epsilon]$ dans le terme $[\sigma]$.

II-5-5 Formulation du problème

La combinaison entre les équations de Maxwell, les relations constitutives et les relations de passage permet de formuler le problème électromagnétique suivant différentes variables d'états.

Les phénomènes électromagnétiques dans les régions conductrices du domaine d'étude sont régis par les équations de la magnétodynamique. Les formulations généralement utilisées pour exprimer l'équation finale à résoudre s'appuient sur des formulations en potentiel vecteur magnétique A ou champ électrique E et les formulations en champ magnétique H .

Dans notre cas nous avons utilisé une formulation analytique en H .

L'équation à résoudre est obtenue comme suite :

On réécrit l'équation (II-6):

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

On a: $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$ l'équation (II-7) devient :

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} \tag{a}$$

$$\vec{J} = [\sigma] \vec{E} + [\epsilon] \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$[\epsilon] \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \Rightarrow \vec{J} = [\sigma] \vec{E} \tag{b}$$

Donc, à partir (b) dans (a) s'écrit:

$$\text{rot} \vec{H} = [\sigma] \vec{E}$$

$$\frac{1}{[\sigma]} \text{rot} \vec{H} = \vec{E}$$

$$\text{rot} \left(\frac{1}{[\sigma]} \text{rot} \vec{H} \right) = \text{rot}(\vec{E})$$

On a :

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \text{ et } \vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$\text{rot} \left([\sigma]^{-1} \left(\text{rot} \vec{H} \right) \right) + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0 \tag{II-21}$$

II-6 formulation du problème direct par une méthode analytique

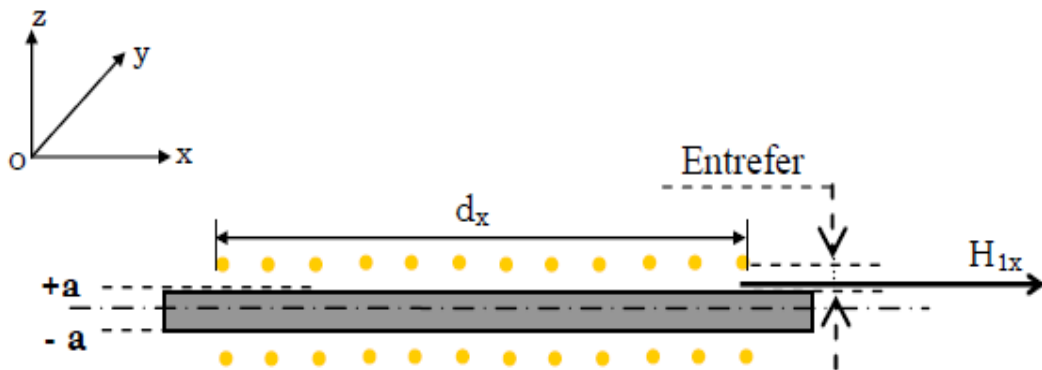


Figure II-4 Plaque semi infinie soumise à un champ tangentiel

Le système bobine/plaque de la (figure II.2) peut être représenté sous la forme d'une plaque fixe infinie suivant x et y et d'épaisseur 2a suivant z (Figure II. 4).

Le courant ne circule que suivant y, la plaque sera alors soumise à un champ magnétique tangentiel (H_{1x}) suivant x qui est donné par [3] :

$$H_{1x} = \frac{N}{d_x} \cdot I \quad (\text{II-22})$$

Avec:

I : Courant circulant dans la bobine.

N : Nombre de spires.

d_x : Largeur qu'occupent les N spires.

La formulation en H dans la plaque s'écrit :

$$\vec{\text{rot}}\left([\sigma]^{-1}\left(\vec{\text{rot}}H\right)\right) + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0$$

Et comme nous utilisons une méthode analytique, nous avons précisé précédemment que nous avons identifié la conductivité électrique suivant le sens du bobinage (σ_y), nous pouvons simplifier alors l'équation à résoudre :

$$\frac{1}{\sigma_y} \left(\vec{\text{rot}}\left(\vec{\text{rot}}H\right)\right) + j\mu\omega H_x = 0$$

La composante du champ électromagnétique est nulle suivant l'épaisseur de la plaque OZ et suivant la direction OY . La rotation du champ magnétique peut s'écrire alors :

$$\frac{1}{\sigma_y} \frac{d^2 \vec{H}_x}{dz^2} + j\mu\omega H_x = 0$$

la solution devient comme suivant :

$$H_x = H_{1x} \frac{\cosh\left(\frac{1+j}{\delta_y} \cdot z\right)}{\cosh\left(\frac{1+j}{\delta_y} \cdot a\right)} \quad (\text{II-23})$$

La puissance apparente P dans la plaque est calculée à partir du théorème de **Poyntin** : [3]

$$P = S \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot \mathbf{n} \quad (\text{II-24})$$

\mathbf{H}^* : est le conjugué de H

\mathbf{n} : Vecteur normal à la surface S.

S : Section active ou surface de la plaque occupée par les N spires, elle est
Donnée par :

$$S = 2d_y \cdot d_x$$

E : Champ électrique, donné par l'expression suivante:

$$E_y = \frac{J_y}{\sigma_y} = H_{1x} \frac{(1+j)\sinh\left(\frac{1+j}{\delta_y} \cdot z\right)}{\delta_y \cdot \sigma_y \cdot \cosh\left(\frac{1+j}{\delta_y} \cdot a\right)} \quad (\text{II-25})$$

Après introduction de (II-23) et de (II-25) dans (II-24), la puissance s'écrit :

$$P = \frac{H^2_{1x} S}{\delta_y \cdot \sigma_Y} (1 + j) \cdot \tanh\left(\frac{1 + j}{\delta_y} \cdot a\right) \quad (\text{II-26})$$

En posant :

$$(1 + j) \cdot \tanh\left(\frac{1 + j}{\delta_y} \cdot a\right) = F + jG \quad (\text{II-27})$$

La puissance totale dans le système est donnée par :

$$P_t = \left(\frac{N^2 \cdot d_y}{d_x \cdot \delta_y \cdot \sigma_{yy}} \cdot F + R_i \right) \cdot I^2 + J \omega \cdot \left(\frac{N^2 \cdot d_y \cdot \delta_y \cdot \mu}{2 \cdot d_x} \cdot G \right) \cdot I^2 \quad (\text{II-28})$$

Où $R_i I^2$ représentent les pertes par effet Joule dans les fils de cuivre de la bobine.

Cette puissance peut aussi s'écrire :

$$P_t = RI^2 + JL \omega I^2 \quad (\text{II-29})$$

Par identification, de (II-29) et (II-28) on conclut que la résistance du système est :

$$R = \frac{N^2 d_y}{d_x} \cdot \frac{F}{\delta_y \sigma_y} + R_i \quad (\text{II-30})$$

Et l'inductance est,

$$L = \frac{N^2 d_y}{d_x} \cdot \frac{\delta_y \cdot \mu \cdot G}{2} \quad (\text{II-31})$$

II-7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, la technique d'identification de la conductivité électrique que nous avons proposée. Celle-ci consiste à comparer la résistance calculée du système bobine-plaque à l'aide d'un modèle analytique à la résistance mesurée jusqu'à égalité. Cette égalité est obtenue par modification de la conductivité électrique dans le modèle de calcul, et donc correspond à la conductivité électrique de la plaque conductrice.

III-1 Introduction

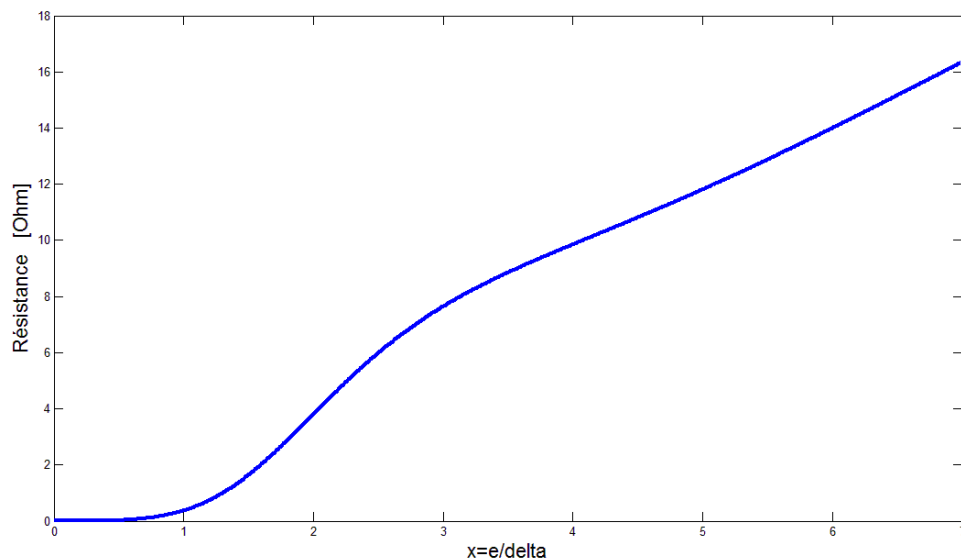
Pour montrer l'influence de la conductivité électrique sur l'impédance du système bobine plaque, nous allons tracer séparément la variation de résistance et de l'inductance en fonction du produit fréquence conductivité. Puis nous présenterons les différentes méthodes de mesures de l'impédance et les résultats obtenus sur le cas de validation.

III-2 Quelques résultats de simulation

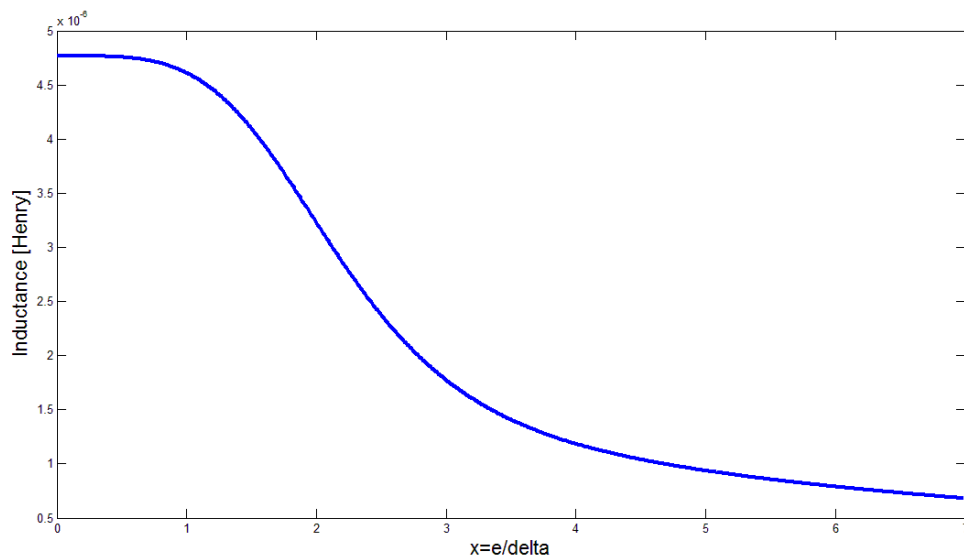
Pour voir l'influence de la fréquence et de la conductivité électrique sur la résistance mesurée du système bobine plaque nous avons tracé à l'aide du modèle analytique la variation de la résistance en fonction du produit fréquence conductivité divisé par l'épaisseur de la plaque.

Nous remarquons que le taux de variation de la résistance est nettement meilleur que celui de l'inductance (Figure III.1 et III.2).

Nous remarquons également que, le taux de variation de la résistance change en fonction du produit fréquence conductivité. Donc pour une conductivité donnée, il est conseillé de chercher la conductivité au tour de la fréquence qui donnerait le meilleur taux de variation de la résistance, dans le but d'avoir une meilleure précision dans l'identification de la conductivité.



FigureIII.1 variation de la résistance en fonction du produit fréquence conductivité



FigureIII.2 variation de l'inductance en fonction du produit fréquence conductivité

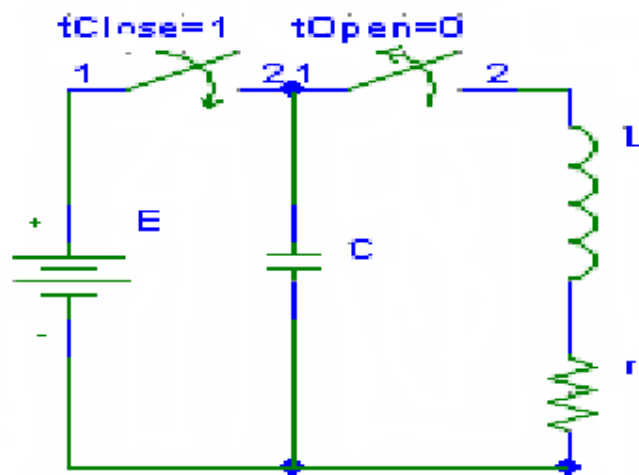
III-3 Méthodes de Mesures de l'impédance

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour mesurer l'inductance et la résistance du système étudié:

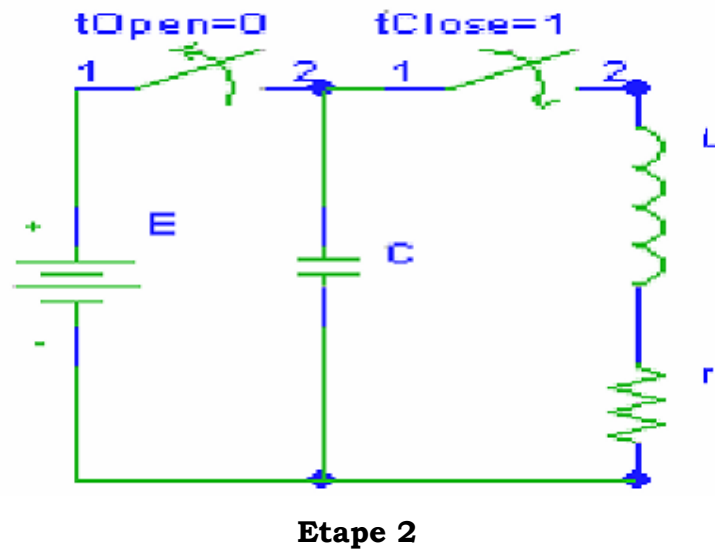
- ✓ Les méthodes de résonances série et parallèle,
- ✓ La méthode du pont de Maxwell,
- ✓ La méthode d'oscillations libres

La mesure de l'impédance du système étudié à l'aide de ces méthodes, nécessite un montage expérimental indépendant. Dans chaque montage, sont incorporés un condensateur et généralement des résistances.

III-3-1 Oscillation libre :



Etape 1



FigureIII.2 La méthode d'oscillations libres

Dans la première étape on alimente le condensateur, et l'étape 2 : On met hors tension le condensateur et on le laisse se décharger sur l'ensemble L r.

La tension aux bornes du condensateur est alors, après résolution de l'équation différentielle qui régit le circuit RLC en oscillation libre :

$$U_c = A \cdot e^{-m\omega_0 t} \cos(\omega_p t + \varphi) \quad \text{(III-1)}$$

$$\omega_p = \omega_0 \sqrt{1 - m^2} \quad \text{(III-2)}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{Lc}} \quad \text{(III-3)}$$

$$m = \frac{r}{2L\omega_0} \quad \text{(III-4)}$$

A et φ sont déterminés à partir des conditions initiales

On calcule à partir du signal que l'on récupère à l'aide d'un oscilloscope, l'inductance L et la résistance r de la manière suivante :

$$L = \frac{1}{C \cdot \omega_0^2} \quad (\text{III-5})$$

$$r = \frac{L \omega_0}{n\pi} \cdot \ln \frac{A_0}{A_n} \quad (\text{III-6})$$

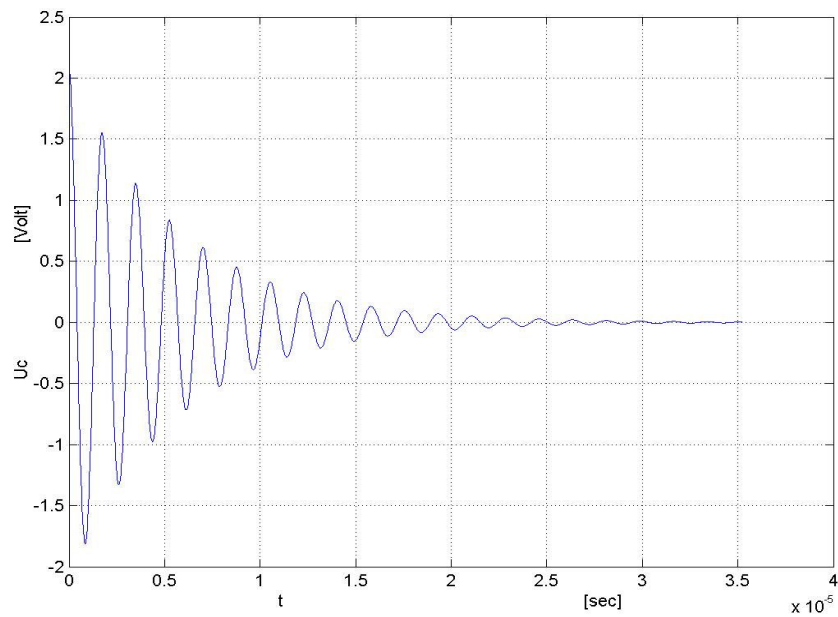


Figure III.3 signalé à l'aide d'un oscilloscope

III-3-2 Pont de Maxwell

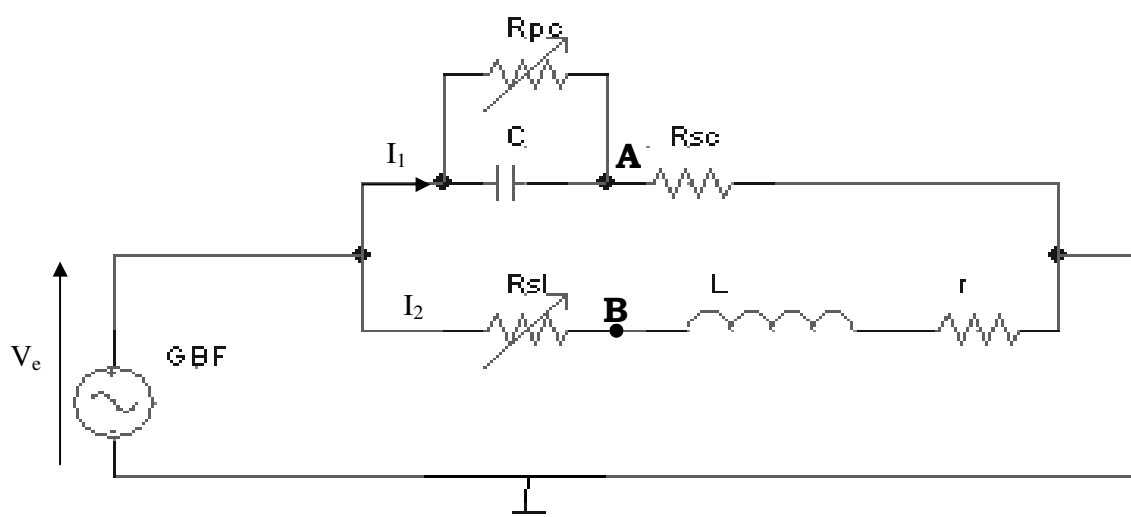


Figure III.4 Pont de Maxwell

A l'équilibre :

$$V_A = V_B$$

$$V_A = V_e \frac{R_{sc}}{R_{pc} \parallel \left(\frac{1}{jC\omega} \right)}$$

$$V_A = V_e \frac{R_{sc}(R_{pc} \cdot jC\omega + 1)}{R_{pc}}$$

$$V_B = V_e \frac{r + jL\omega}{R_{sl}}$$

$$\text{Donc : } \frac{R_{sc}(R_{pc} \cdot jC\omega + 1)}{R_{pc}} = \frac{r + jL\omega}{R_{sl}}$$

$$jR_{sc} \cdot R_{pc} \cdot R_{sl} \cdot C\omega + R_{sc} \cdot R_{sl} = R_{pc} \cdot r + jR_{pc} \cdot L\omega$$

$$\text{D'où : } r = \frac{R_{sc} R_{sl}}{R_{pc}} \quad \text{et} \quad L = C \cdot R_{sc} \cdot R_{sl}$$

III-3-3 La méthode de résonances parallèle

La mesure de l'impédance du système étudié à l'aide de méthodes La méthode de parallèle, nécessite un montage expérimental indépendant. Dans Le figure III.1 est incorporé un condensateur et généralement des résistances, montre montage réalisé ainsi que les calculs nécessaires à l'identification de l'impédance de la bobine.

Cette méthode nécessite l'ajout d'un condensateur dont la valeur est calculée pour obtenir une sensibilité maximale.

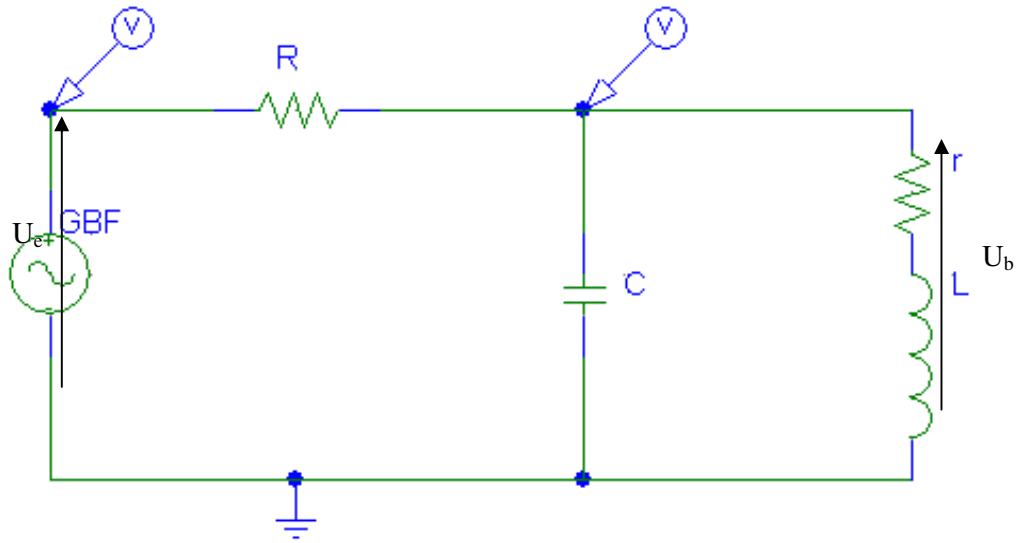


Figure III.5 Résonance parallèle

La variation de la conductivité électrique de la plaque, induit une variation sur l'inductance L et la résistance r du système bobine plaque. D'où la variation de l'impédance Z_{eq} du bouchon et donc de U_c en fonction de la conductivité électrique.

Z_{eq} , est calculée comme suite:

$$Z_{eq} = \frac{(r + j \cdot L \cdot \omega) \cdot \frac{1}{j \cdot c \cdot \omega}}{(r + j \cdot L \cdot \omega) + \frac{1}{j \cdot c \cdot \omega}} \quad (1)$$

Multiple (1) et $(j \cdot c \cdot \omega)$, on trouve :

$$Z_{eq} = \frac{(r + j \cdot L \cdot \omega)}{(r \cdot c \cdot j \cdot \omega - L \cdot \omega^2 \cdot c + 1)} \quad (2)$$

Multiple (2) et $\frac{(1 - (L \cdot \omega^2 \cdot c) - r \cdot c \cdot j \cdot \omega)}{(1 - L \cdot \omega^2 \cdot c - r \cdot c \cdot j \cdot \omega)}$.

Alors:

$$Z_{eq} = \frac{r + j\omega \cdot (L - c \cdot r^2 - c \cdot (L \cdot \omega)^2)}{(1 - L \cdot \omega^2 \cdot c)^2 + (r \cdot c \cdot \omega)^2} \quad . \text{ Avec,}$$

$$r = R_i + R_{ch}$$

$$R_i = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{L_b}{S_b}$$

Z_{eq} , est maximal à la résonance, c'est-à-dire à :

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{1}{Lc} - \left(\frac{r}{L} \right)^2 \right)}$$

$$Z_{eq} = \frac{L}{c \cdot r}$$

Avec :

$$Z_{eq} = \frac{R \cdot U_b}{U_e - U_b}$$

$$L = \frac{C \cdot Z_{eq}}{(\omega \cdot C \cdot Z_{eq})^2 + 1} \quad \text{et} \quad r = \frac{L}{C \cdot Z_{eq}}$$

III-4 Validation de la méthode

En vue de valider la technique proposée, nous avons réalisé un bobinage au tour d'une plaque conductrice. Cette plaque en cuivre provient d'un objet électroménager ancien.

Au laboratoire du département électrotechnique, nous avons mesuré les dimensions caractéristiques du système (blaque-bobine) à l'aide d'un pied à coulisse. Et nous avons également réalisé des montages électroniques exprimant les différentes méthodes recensées de mesure de l'impédance (figure III.1).

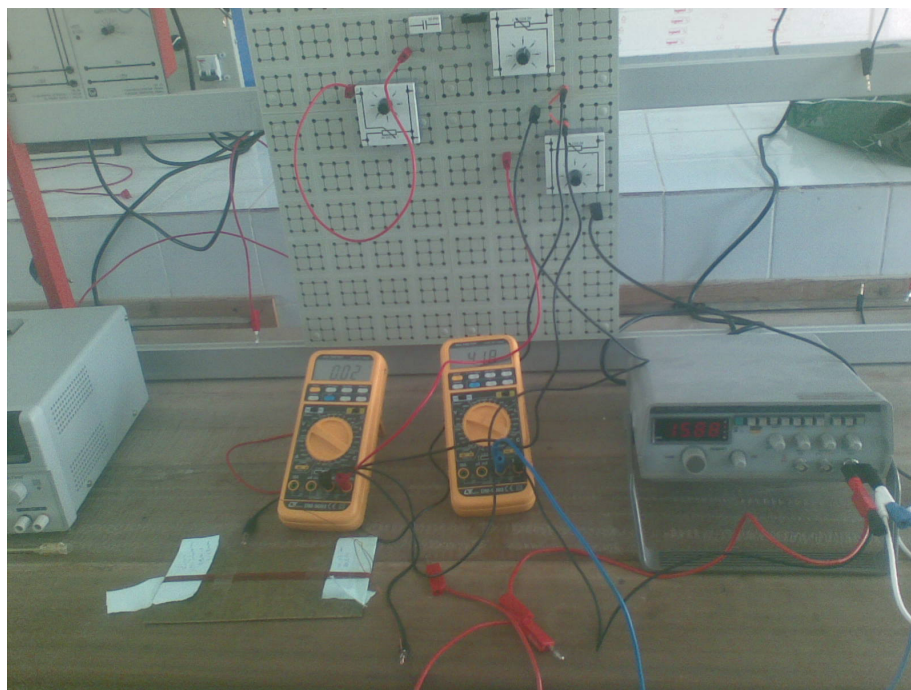


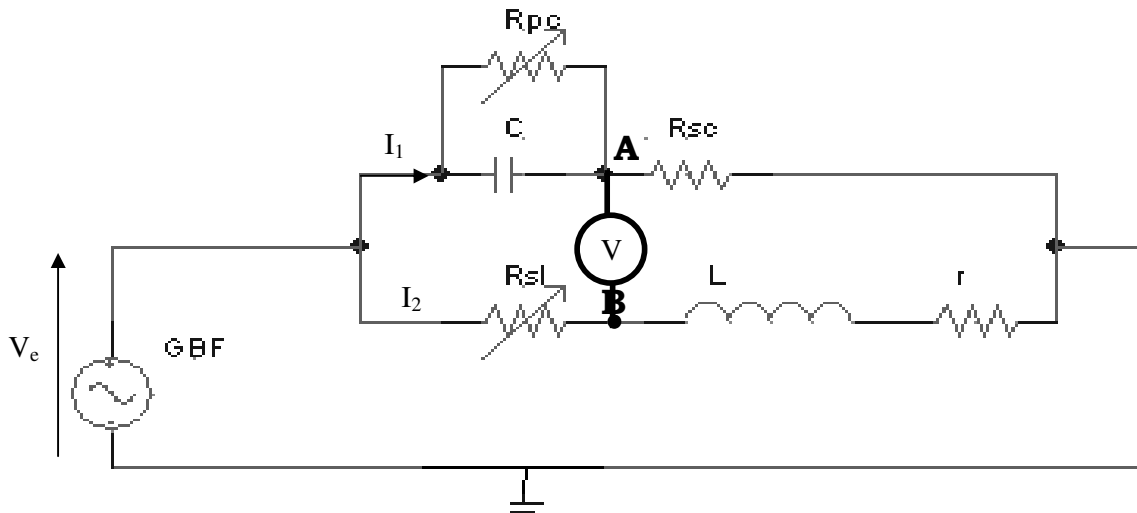
Figure III. 6 vues d'ensemble des manipulations expérimentales réalisées

Pour Nous avons voulu utiliser la méthode d'oscillation libre (voir III.3.1), qui est logiquement la méthode de mesure la plus précise, mais celle-ci nécessite l'utilisation d'un oscilloscope numérique avec un système de déclenchement. Malheureusement, notre laboratoire ne possède pas ce matériel.

Nous n'avons donc pu appliquer que les deux autres méthodes (III.3.2 et III.3.3).

III-4-1 Résultats de mesure de la résistance :

a- méthode du pont de Maxwell :



Nous avons donc réalisé le montage ci-dessus.

A l'équilibre du pont ($V_{AB}=0$) obtenu en ajustant les résistances R_{sc} , R_{sl} et R_{pc} , nous avons mesuré ces résistances à l'aide d'un Ohmmètre :

$$R_{sc} = 31,7\Omega$$

$$R_{sl} = 71,7\Omega$$

$$c = 10nf$$

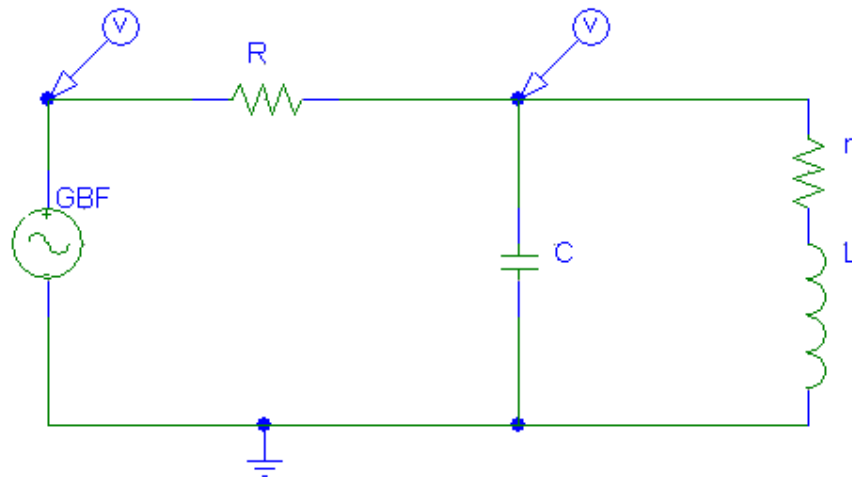
A l'équilibre du pont :

$$r = \frac{R_{sc} \cdot R_{sl}}{R_{pc}} = 183,29\Omega$$

$$L = C \cdot R_{sc} \cdot R_{sl} = 0,39\mu\text{H}$$

Lors de la recherche du point d'équilibre du pont, nous avons remarqué qu'on ne peut pas avoir un zéro absolu avec le voltmètre utilisé (V_{AB}). Et le minimum (0,02V) est obtenu pour différentes valeurs des résistances ajustables (R_{sc} , R_{sl} , R_{pc}). De ce fait cette méthode manque énormément de précision. Cette méthode est donc éliminée.

b- Méthode de résonance parallèle :



Résonance parallèle

Les dimensions caractéristiques du système bobine plaque sont données par le tableau ci-dessous :

Les paramètres	Les valeurs
l'épaisseur de la plaque (e)	1,8 mm
l'entrefer (ξ)	1 mm
diamètre de fil de bobinage (d_x)	0,5 mm
nombre de spire (N)	13 spires
longueur de la plaque (L)	20,2 cm
largeur de la plaque (l)	10,03 cm
largeur active de la bobine (δ)	8,1 mm

Tableau III.1 Les dimensions caractéristiques du système de mesure

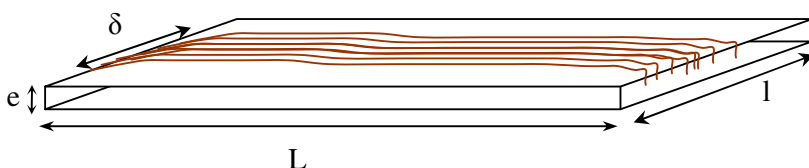


Figure III. 7 Plaque bobinée

Pour mesurer les tensions U_e et U_b nous les avons visualisé sur l'oscilloscope afin de rechercher la résonance du circuit.

On cherchera la conductivité électrique de la plaque qui correspond à la résistance r à l'aide d'une méthode d'interpolation linéaire.

C [nF]	10	22	47	94	220	440
U _e [V]	7,2	6,4	5,8	5,3	4,9	4,7
U _b [V]	5,9	4,6	3,6	2,7	1,8	1,3
f [kHz]	523	344	236,5	162,4	104,8	71,18
Z _{eq} [Ω]	257	165	122	95	73	64
r [Ω]	3,93	2,92	183	1,26	0,71	0,44
R _{plaque} [Ω]	3,86	2,85	1,77	1,21	0,67	0,4

Tableau III.2 Les résultats du mesure et calcule

On négligeant l'effet de proximité entre spires de la bobine, on peut séparer entre la résistance de la plaque et celle de la bobine telle que :

$$R_{plaque} = r - R_{bobin}$$

$$R_{bobine} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{Long}{S_{activ}}$$

$$S_{activ} = S_{tot} - S_{nactiv} = \pi(diam/2)^2 - \pi(diam/2 - \delta)^2$$

Les figures ci-dessous montrent la variation de la résistance et de l'inductance mesurées en fonction de la fréquence

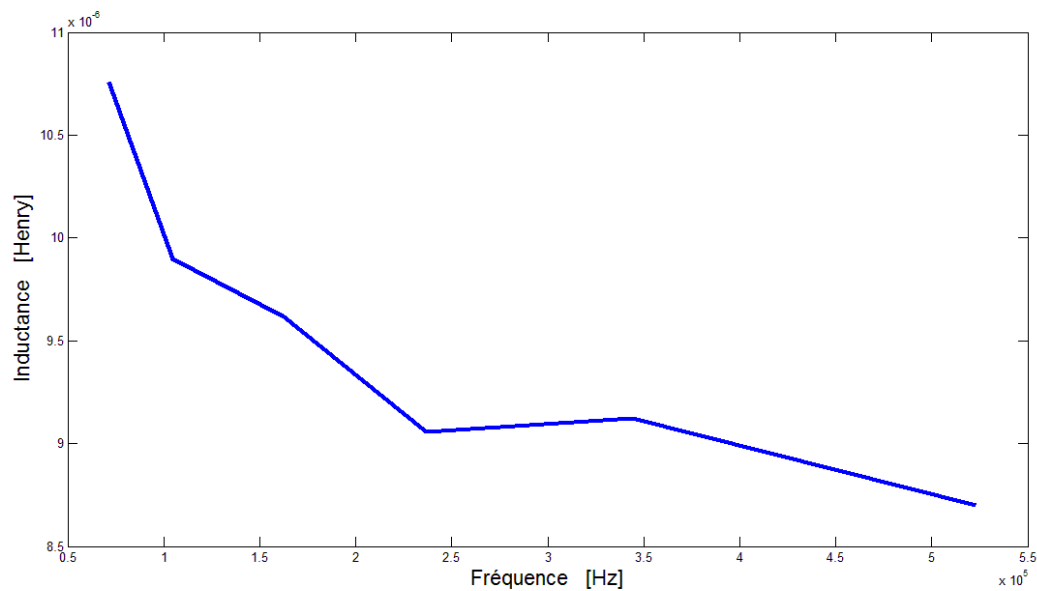


Figure III. 8 vues d'ensemble des manipulations expérimentales réalisées

III-4-2 Résultats d'identification de la conductivité du cuivre :

Nous avons introduit les données des tableaux III.1 et III.2 dans le code de calcul, qui exprime la méthode analytique pour le problème direct et une méthode d'inversion pour le problème inverse. Le code de calcul est implanté dans Matlab.

Dans le cas de la plaque de cuivre nous avons obtenu les résultats suivants :

Fréquence [kHz]	523	344	236,5	162,4	104,8	71,18
Sigma [MS/m]	0.36	0.45	0.78	1.16	2.44	4.82
Delta [mm]	0.09	0.11	0.14	0.16	0.20	0.25

Tableau III.3 Les résultats du calcul

Nous remarquons que la conductivité identifiée dans le cas de la plaque de cuivre dont nous disposons n'est pas la même pour toutes les fréquences. La cause revient au fait que la plaque n'est pas uniforme sur une des surfaces. Et pour les fréquences élevées l'épaisseur de peau est très faible, de ce fait les courants induits dans la plaque en cuivre rencontrent des régions isolantes ce qui fait que la résistance est élevée et donc la conductivité est faible.

III-5 Résultats d'identification de la conductivité du cuivre :

La méthode proposée est donc validée dans le cas d'une plaque en cuivre qui est un matériau homogène et isotrope.

Cette méthode pourrait être facilement appliquée au cas des matériaux composites conducteurs, matériaux hétérogènes et anisotropes.

III-6 Conclusion

Dans ce chapitre on a validé deux méthodes pour mesurer la résistance(r) et l'inductance (L), l'application de la première méthode "pont de maxwell", on n'a vu pas un zéros absolu avec le voltmètre utilisé (V_{AB}), et le minimum est ($0,02V$). Pour cela on obtient les différentes valeurs des résistances (R_{sc} , R_{sl} , R_{pc}). Sont pas précises de ce fait cette méthode est éliminée.

La méthode de résonance parallèle, qui déterminée l'impédance de système étude et donc, on a déterminé la conductivité.

Conclusion Générale :

Les matériaux composites associent matière plastique et renfort en fibres, généralement de verre ou de carbone, leurs propriétés, notamment de légèreté ou de résistance. Ces avantages leur ont ouvert des marchés importants dans la construction automobile, l'aéronautique, ou encore le bâtiment.

La conductivité électrique des matériaux métalliques ou composites conducteurs est une donnée essentielle pour le dimensionnement des installations de chauffage par induction et de contrôle non destructif par courants de Foucault.

Pour identifier cette conductivité, nous avons développé une technique basée sur la mesure de l'impédance. Cette technique consiste à entourer le matériau sous forme de plaque par un bobinage et à mesurer l'impédance de l'ensemble bobine-plaque. L'ensemble est modélisé par une méthode analytique qui permet le calcul de la résistance. Cette dernière est comparée à celle mesurée à l'aide d'une méthode d'inversion jusqu'à identification de la conductivité électrique.

Nous avons montré que la fréquence a un rôle considérable dans la précision d'identification. Nous avons également montré que la résistance est plus sensible à la variation de conductivité que l'inductance.

Nous avons validé la méthode sur un matériau de conductivité connue (cuivre).

En perspectives :

- ✓ Il est intéressant d'acquérir un oscilloscope numérique à système de déclenchement pour appliquer la méthode d'oscillations libres qui paraît plus précise que les deux autres méthodes utilisées.
- ✓ Il est également intéressant de modéliser le système bobine plaque par une méthode numérique, comme par exemple la méthode des éléments finis, pour prendre en compte les phénomènes négligés dans la méthode analytique.
- ✓ On souhaiterait appliquer cette sur des matériaux composites conducteurs de production nationale.

OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

Proposé et dirigé par : Messieur: Samir BENSAID

Présenté par : Laid BOUAFIA
Fouaz LAMINE

Thème :

**DETERMINATION DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DES
MATERIAUX COMPOSITES RENFORCES EN FIBRES DE CARBONE
PAR LA METHODE D'IMPEDANCE**

Résumé :

Le contrôle non destructif par courants de Foucault et le chauffage par induction de des matériaux composites nécessitent une homogénéisation électromagnétique et thermique. Cela peut se faire par des méthodes multi-échelles ou bien par des méthodes expérimentales. Dans notre projet nous allons utiliser une méthode d'homogénéisation expérimentale pour rechercher la conductivité équivalente des matériaux composites.

La méthode en question est basée sur le calcul et la mesure de l'impédance par la technique des courants de Foucault.

Mots Clés :

Matériaux composites, conductivité électrique, impédance, composite.

Références bibliographiques

- [1] **André VANDER VORST**, « Électromagnétisme, Champ et circuit ».
- [2] **M.L. Benzeggagh**, Polycopié du cours MQ13 en 4 tomes sur les matériaux composites
- [3] **Samir BENSaid**, « Contribution a la caractérisation et a la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes ». Thèse de doctorat, Soutenue le 12 Décembre 2006, Ecole Centrale de Paris de l'Université de Nantes,
- [4] **Vincent doirat**, « Contribution à la modalisation de système de contrôles non destructifs par courants de Foucault ». thèse de doctorat de l'université de Nantes.2007.
- [5] **D. Gay**, « Matériaux Composites », 3ème édition Ed. Hermès, 1991.
- [6] **Nadia BAHLOULI**, Cours Matériaux Composites « DESS Mécanique avancée et Stratégie industrielle ».
- [7] **Nadine Bourgeois**, « Caractérisation et modélisation micromécanique du comportement et de L'endommagement d'un composite à matrice métallique : Al/SiCp », thèse de doctorat
Soutenue le 18 janvier 1993, Ecole Centrale de Paris
- [8] **Kamel Khellil**, « Evaluation expérimentale d'un critère de rupture tensoriel polynomial
Tridimensionnel pour matériaux composites », thèse de doctorat
soutenue le 18 janvier 1993,
Université de Technologie de Compiègne
- [9] **J. Lemaitre et J.-L. Chaboche**, « Mécanique des matériaux solides », Ed. Dunod.
- [10] **Ahmed Sghaie Bouazzi**, « MATERIAUX POUR L'ELECTRICITE ET L'ELECTRONIQUE ».

[11] **O. Biro, K. Preis**, “On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 25, No. 4, pp. 3145-3159, July 1989.

[12] **O. Biro, A. Bkdi, K. Preis, W. Renhart and K-R. Richter**, “A Finite Element Formulation for Eddy Current Carrying Ferromagnetic Thin Sheets”, IEEE Transactions on Magnetic, Vol. 33, N° 2, pp- 1173–1178, March 1997.

[13] **L. Berreur, B. De Maillard, S. Nösperger**, “L’industrie française des matériaux composites”, étude stratégique (Rapport de synthèse) réalisée par Nodal consultants pour le compte de la Digitip / SIM, 14 Mai 2002.