

2.1 INTRODUCTION

Le principe du CND par courants de Foucault qui consiste à placer la zone à examiner dans un champ électromagnétique et à recueillir en surface une perturbation de celui-ci liée à la présence d'un objet ou d'un défaut. Le système est donc constitué d'une source électromagnétique, d'un capteur et d'un organe de traitement de l'information recueillie dont le rôle est de caractériser l'intrus.

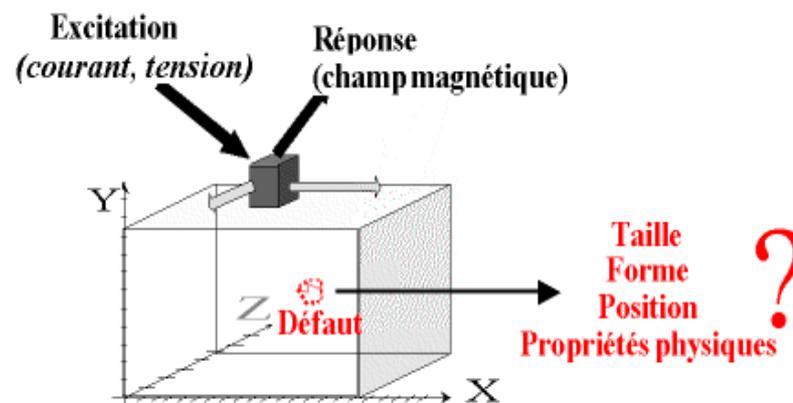


Fig.II.1. *Principe du CND par Courants de Foucault*

Dans ce chapitre, la première partie est consacrée aux principaux dispositifs et techniques du contrôle existants. Puis nous nous intéresserons à la présentation du code de calcul pour le CND «MESSINE», enfin, nous proposerons le protocole de comparaison entre un calcul numérique par la méthode des éléments finis et celui de calcul analytique en utilisant le code MESSINE.

2.2 LE PRINCIPE DU CONTRÔLE PAR COURANTS DE FOUCAULT

Le contrôle par courants de Foucault est basé sur les lois de l'induction magnétique (découverte par Faraday). On appelle courant de Foucault, les courants induits dans un matériau conducteur par une variation de flux d'induction magnétique. D'après la loi de Lenz, ces courants se développent de manière à s'opposer au phénomène qui leur a donné naissance.

Il en découle, dans le matériau, une induction résultante variant en module est en phase, en fonction de l'épaisseur traversée par cette dernière.

L'intensité de la répartition de l'induction et donc des courants de Foucault dépendent principalement de :

- La conductivité
- La perméabilité
- La fréquence du courant d'excitation
- La géométrie du conducteur (siège des courants induits)
- La géométrie de l'inducteur
- La présence éventuelle défaut
- De l'entrefer inducteur matériau sous contrôle

L'amplitude des courants induits diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne de la source d'excitation : c'est le phénomène d'effet de peau (chapitre I), et de même pour l'induction. De plus, l'intensité de ceux-ci est liée à l'importance des variations de flux. En effet, plus la variation de flux est élevée, plus l'intensité des courants est importante à proximité de l'inducteur, et plus cette intensité décroît rapidement avec la profondeur.

On peut de cette manière injecter de l'énergie électromagnétique dans la pièce à contrôler sans qu'il y ait de contact. Par l'intermédiaire de mesure adaptée, l'évolution de cette énergie va donner accès à certaines informations concernant la pièce métallique (conductivité, perméabilité, présence de défauts,...).

2.2.1 Capteur et technique de contrôle

2.2.1.1 Eléments d'excitation et de mesure

L'excitation est assurée en pratique par une bobine alimentée sous une tension ou par un courant variable. Pour des raisons de facilité de réalisation, les bobines sont de forme circulaire. Trois principaux types de capteurs sont utilisés : la bobine encerclante, la bobine ponctuelle et la sonde (fig.II.2.3).

La bobine encerclante (fig.II.2.1) est un capteur où la pièce à contrôler prend place à l'intérieur des enroulements. Ce type de capteur est bien adapté au contrôle des tubes ou des barres. La bobine ponctuelle (fig.II.2.2) est un capteur destiné à l'examen local de la surface de la pièce à contrôler. En pratique, il s'agit d'une petite bobine qui peut être déplacée sur ou près de la surface. Elle couvre une zone égale à sa surface. Elle permet l'accès à des zones exigües réputées difficiles pour des capteurs usuels.

Pour finir, la sonde (fig.II.2.3), est un capteur destiné à l'examen des tubes par l'intérieur. Elle peut être déplacée à travers un tube ou une conduite. Il existe la sonde dite 'axiale', (sonde dont les enroulements sont bobinés autour de l'axe de translation de celle-ci) et la sonde dite 'tournante' (constituée d'une bobine ponctuelle tournant autour de l'axe de translation de celle-ci). Ce type de capteur s'est principalement développé pour l'inspection des tubes des générateurs de vapeur dans les installations nucléaires, le contrôle des tubes par l'extérieur étant impossible. La réponse du dispositif à l'excitation est recueillie par un élément sensible à une grandeur électromagnétique, dans la plupart des cas, on mesure une différence de potentiel correspondant à une variation de flux. Cette mesure s'effectue généralement à l'aide d'une bobine.

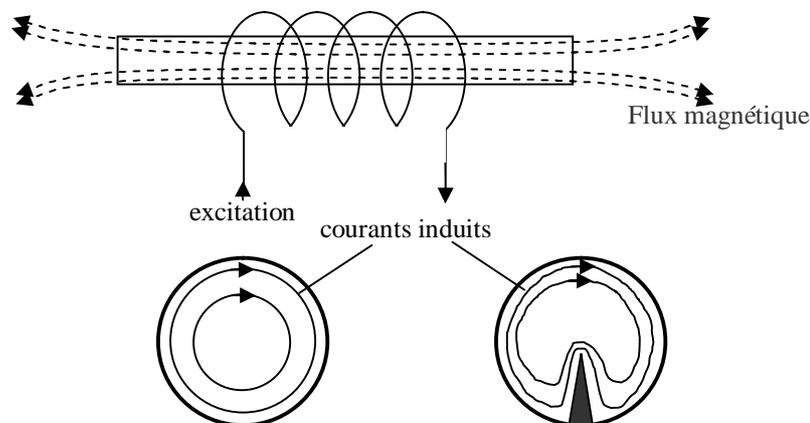


Fig.II.2.1. Contrôle de cylindre

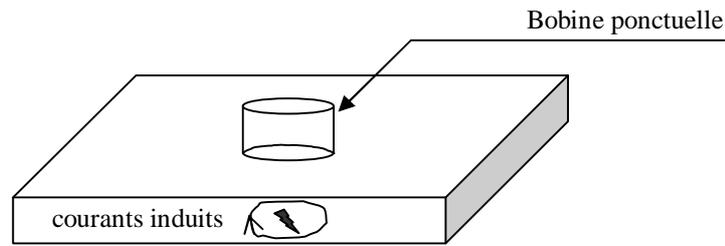


Fig.II.2.2. *Contrôle des pièces planes*

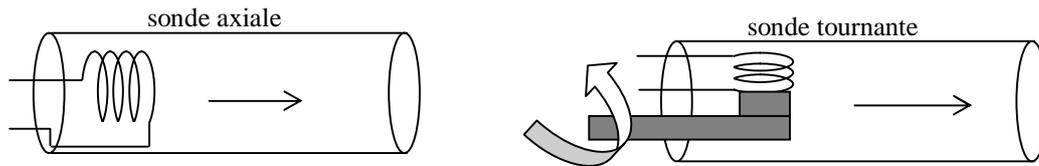


Fig.II.2.3. *Contrôle des tubes*

D'après leurs fonctions, on distingue deux types de capteurs :

- Les capteurs dits à 'double fonction' (fig.II.3.1), dispositif dans lequel les fonctions d'induction et de réception sont assurées par les mêmes enroulements. L'exploitation se fait à partir de la mesure de l'impédance équivalente de la bobine, le calcul de cette impédance est basé sur le modèle de transformateur, le primaire étant la bobine et le secondaire en court-circuit étant constitué par le matériau.
- Les capteurs dits 'à fonction séparées' (fig.II.3.2), dans ce cas, les fonctions d'excitations et de réception sont assurées par des éléments distincts. La réception peut alors se faire à un endroit distinct de l'excitation, au niveau de la mesure, ce type de dispositif permet de s'affranchir des variations d'impédance de la bobine dues aux dérives thermiques. De plus leur sensibilité est supérieure à celle du capteur à double fonction.

Dans la plupart des cas, l'élément de mesure est une petite bobine avec laquelle on mesure une différence de potentielle induite. Néanmoins, il est possible d'utiliser des composants mesurant directement l'induction magnétique telles que les magnétorésistance ou les sondes à effet hall. La mesure effectuée avec ce type de dispositif est une mesure ponctuelle d'un des composantes de l'induction, la détermination et l'orientation de l'élément de mesure ont une importance prépondérante pour ce type de dispositif. La plupart de temps, elles se font de manière expérimentale, néanmoins la simulation numérique permet de déterminer le choix de la composante utilisée et la position optimale des éléments de mesure selon la composante mesurée [14].

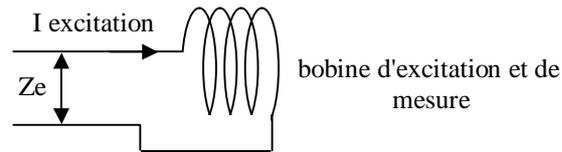


Fig.II.3.1. *Capteur double fonctions*

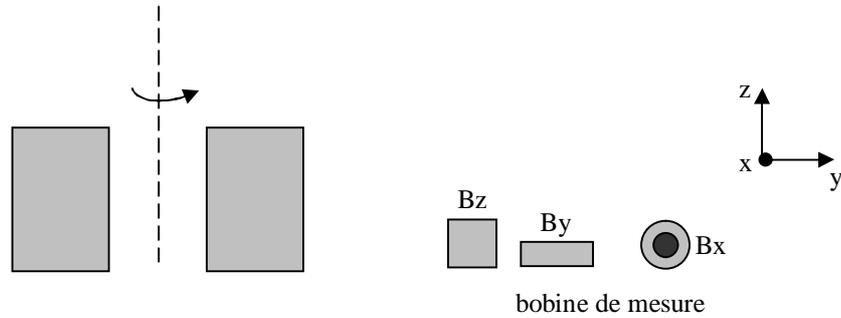


Fig.II.3.2. *Capteur à fonction séparées*

2.2.1.2 Les techniques de mesures

Les techniques de mesure employées sont issues des méthodes classiques de la métrologie.

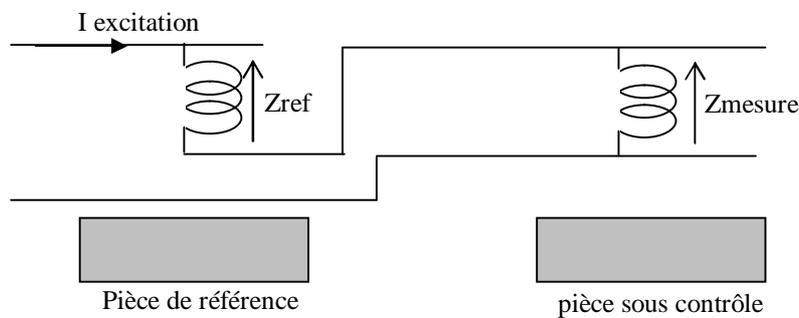


Fig.II.4.1. *Exemple de mode absolu compensé*

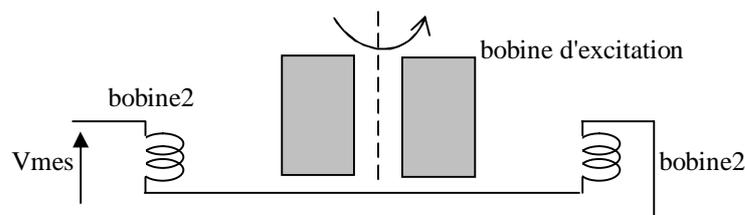


Fig.II.4.2. *Exemple de capteur différentiel*

Les méthodes de mesure existantes sont les suivantes :

- Le mode 'absolu' : on utilise un seul élément de mesure. La mesure est effectuée par rapport à une référence fixe. Ce type de capteur est employé lorsque les variations du signal sont suffisamment élevées (mesure d'épaisseur, de conductivité...).
- Le mode 'absolu compensé', qui utilise deux capteurs absolus (fig.II.4.1). Un des deux capteurs absolus prend place au-dessus d'une pièce de référence fixe (elle permet de s'affranchir des variations d'une grandeur d'influence, température, conductivité...).
- Le mode 'différentiel' où on utilise deux éléments de mesure distincts intégrés au capteur (fig.II.4.2), le signal de mesure étant alors la différence des valeurs fournies par les éléments. La mesure différentielle consiste à comparer deux mesures réalisées simultanément sur deux zones voisines. Cette méthode permet de mettre en évidence des défauts métallurgiques et des discontinuités brutales de la conductivité (fissure, criques...).

Les deux dernières méthodes sont mises en œuvre en utilisant des structures du type pont de Wheatstone.

2.2.1.3 Signaux d'excitation et exploitation

Il existe trois types d'excitation pour les capteurs à courants de Foucault :

- L'alimentation mono fréquence.
- L'alimentation multi fréquentielle.
- L'alimentation par de courants pulsés

2.2.1.3.1 L'alimentation mono fréquence

Ce type de contrôle est celui le plus largement utilisé dans l'industrie est tous les capteurs double fonctions utilisent cette méthode. Le capteur est alimenté par un courant ou une tension sinusoïdal à fréquence déterminée (d'une centaine de Hertz à une dizaine de Mhz selon les applications) et le contrôle se fait par une mesure d'impédance de la bobine.

L'exploitation se fait à l'aide du plan d'impédance normalisée. On utilise quatre grandeurs :

- La réactance de la bobine seule X_0
- La résistance de la bobine seule R_0
- La réactance de la bobine en présence du matériau X
- La résistance de la bobine en présence du matériau R

Les paramètres X et R permettent de représenter respectivement la puissance réactive et active mis en jeu dans l'ensemble du dispositif et en particulier dans la pièce sous contrôle où sont induits les courants de Foucault [12], on définit :

- La réactance normalisée : $X_n = X/X_0$
- La résistance normalisée : $R_n = (R-R_0)/X_0$

L'évolution de l'impédance normalisée est tracée dans le plan $X_n = f(R_n)$. La trajectoire parcourue par l'extrémité du vecteur impédance (fig.II.5), lors d'un déplacement de la bobine sera caractéristique d'une propriété du matériau et constituera une signature.

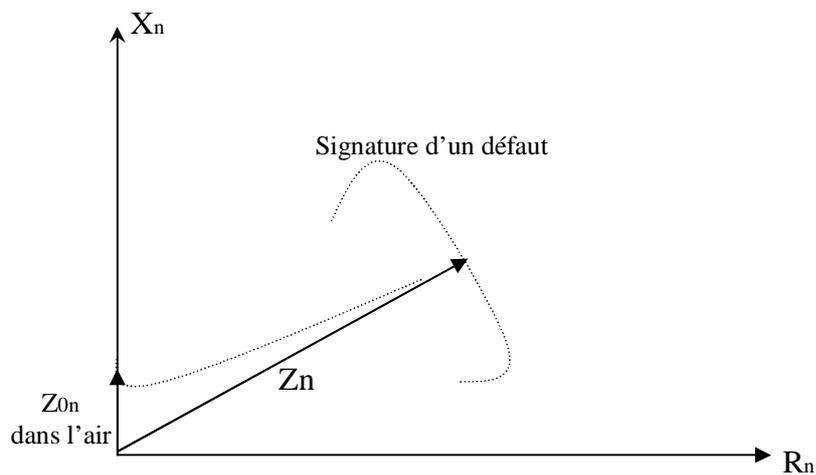


Fig.II.5. *Diagramme d'impédance normalisée*

Z_{0n} : Impédance normalisée de la bobine dans l'air, $Z_{0n} = j$

Z_n : Impédance normalisée de la bobine au contact du matériau

2.2.1.3.2 L'alimentation multi-fréquentiel

Dans le contrôle mono fréquentiel, on est limité à deux informations : la résistance et la réactance normalisées. Si ce type de contrôle permet une localisation spatiale d'un défaut et parfois une localisation sur sa taille, il ne permet pas de dissocier plusieurs informations (présence de plusieurs défauts) ou l'information d'une grandeur perturbatrice (entretoises dans les tubes des générateurs de vapeur).

La technique multifréquence permet de discriminer un nombre de paramètres supérieur à deux. Elle constitue une extension de la technique mono fréquence et permet d'exploiter n fréquences différentes (deux ou quatre) et fournit $2n$ informations.

Le développement des techniques multifréquence résulte d'un double objectif; positionner et caractériser un défaut à partir d'un signal global résultant de la combinaison du signal utile dû au défaut et de bruits parasites ayant des origines diverses.

Cette méthode entraîne un surcoût important. Elle reste limitée au secteur présentant des impératifs de sécurité importants.

2.2.1.3.3 L'alimentation par des courants pulsés

Cette méthode de contrôle est une extension de la méthode multi fréquentielle. Elle présente deux principaux avantages par rapport au contrôle mono fréquentiel :

Un signal d'excitation pulsé (signal à durée finie) atteint en intensité une valeur élevée (plusieurs ampère), contre une centaine de milliampère pour un signal sinusoïdal classique.

Ce type d'excitation utilise un signal à large bande spectrale équivalent à un contrôle multi fréquentiel.

2.2.1.4. Conclusion

Les dispositifs de contrôle par courants de Foucault sont utilisés depuis longtemps dans l'industrie. Leur conception est basée sur le savoir faire expérimental de leur concepteurs. La structure des capteurs est définie de manière empirique. Compte tenu de l'acquis expérimentale très important, les résultats obtenus avec ces capteurs sont très satisfaisants à haute fréquence (mesure d'épaisseur, défauts débouchant). Pour la détection de défauts profonds, de nouveaux types de capteurs, adaptés à un signal pulsé défini par rapport aux défauts recherchés, ont été développés pour palier l'insuffisance des méthodes classiques.

Néanmoins, en terme de dimensionnement du défaut recherché, il n'existe actuellement pas de système de contrôle industriel adapté. La seule information disponible sur le défaut provient de l'interprétation de la signature obtenue et dépend donc de l'expérience du manipulateur.

2.2.2 Le problème inverse en courant de Foucault

La réponse d'un capteur en CND par courants de Foucault dépend de divers paramètres telles que la nature du défaut, la forme de l'inducteur, la forme du courant d'alimentation et la fréquence d'excitation. L'analyse de cette réponse par le biais de mesures doit permettre la reconstruction de la forme de défaut : c'est le problème inverse.

Les méthodes de reconstruction utilisées depuis très longtemps dans le domaine du CND par ultrasons sont appliquées depuis quelque années aux CND par courants de Foucault. Ces méthodes permettent en effet de fournir la cartographie d'une propriété caractérisant le matériau, ce qui autorise l'obtention directe de l'image des inhomogénéités de la pièce.

2.2.2.1 Principe de la méthode

Dans le cas des courants de Foucault, la propriété à reconstruire est la distribution de la conductivité électrique car elle est la caractéristique des matériaux conducteurs. Cette reconstruction est réalisée à partir des mesures effectuées à la surface du milieu à contrôler.

Un tel problème nécessite la résolution de deux problèmes annexes :

- Le problème direct, dans lequel on cherche à établir un modèle (numérique ou analytique) décrivant le plus parfaitement possible les interactions entre le champ électromagnétique incident créé par l'inducteur et le champ de réaction dû aux courants de Foucault induits dans la pièce. Ce modèle doit permettre d'établir la réponse du capteur en présence du défaut à partir des caractéristiques de ce dernier.
- Le problème inverse où l'on essaye, à partir du modèle directe définie dans la première étape et des mesures fournies par l'instrumentation, reconstituer la forme du défaut.

2.2.2.2 Le problème direct

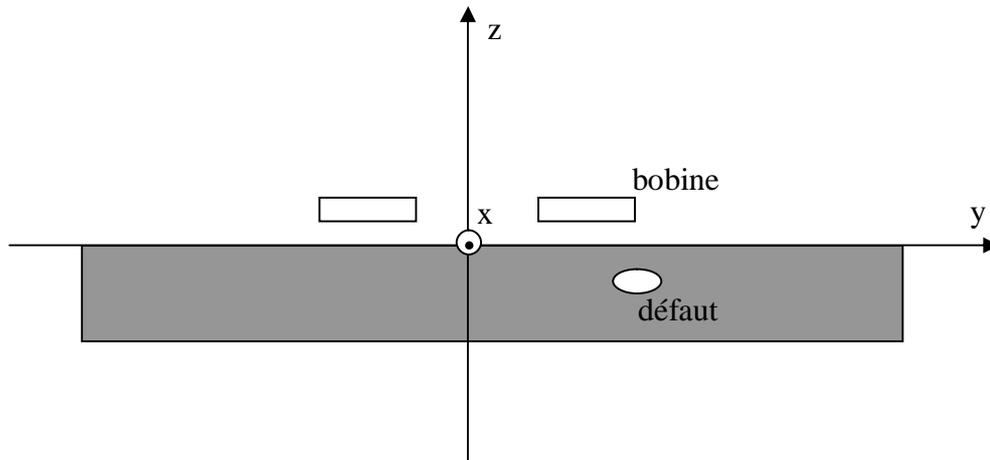


Fig.II.6. *Dispositif simulé pour un problème directe*

Le dispositif simulé dans le cadre de notre étude est représenté schématiquement sur la figure ci-dessus. La bobine est chargée de créer au sein du matériau un champ électromagnétique. La mesure de signal de perturbation est réalisée à la surface du matériau et se fait soit par une mesure d'impédance en déplaçant la bobine au-dessus de la zone du défaut, soit à l'aide d'un capteur de champ qui balaie cette même zone.

Les divers modèles existants et pour décrire les phénomènes sont basés sur les équations de Maxwell (équations : I.1, I.2, I.3, I.4).

La réponse du capteur due au défaut peut se faire soit sous la forme d'une variation d'impédance [13], soit sous la forme d'une force électromotrice e , nous détaillerons le calcul de l'impédance dans le prochain chapitre.

2.2.2.3 Le problème inverse

Le but de cette méthode est de trouver la forme de la frontière du défaut à partir de la mesure de la variation d'impédance d'une bobine en fonction de sa position et de la fréquence d'excitation. Cette méthode évoquée se base sur un processus itératif (fig.II.7), la première étape consiste à résoudre le problème direct pour une forme de défaut initiale estimée a priori. La solution est calculée pour chaque position de la bobine d'excitation, le gradient de l'erreur entre l'impédance mesurée et calculée est établi, puis la forme du défaut est remise à jour. Le processus recommence jusqu'à ce que la convergence soit atteinte.

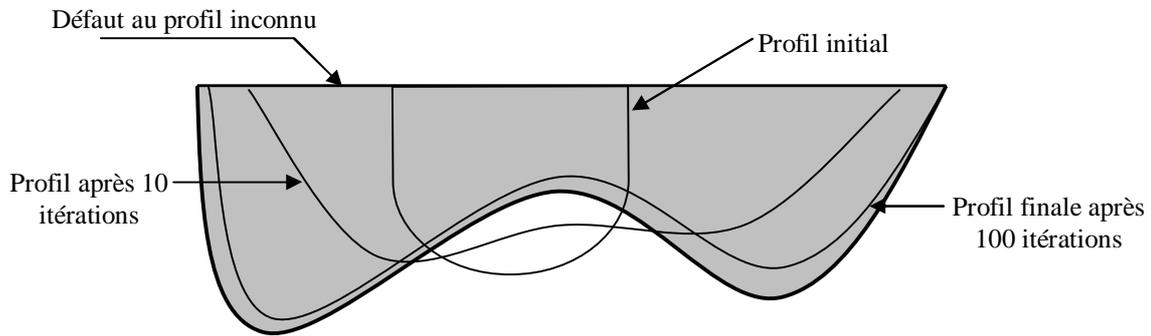


Fig.II.7. Exemple de reconstitution de profil (problème inverse)

2.3 PRESENTATION DE MESSINE « Code de simulation en électromagnétique »

2.3.1 Le principe de MESSINE

Une méthode de modélisation et de simulation en électromagnétisme connue est celle des éléments finis. Cependant, il apparaît bien souvent que le temps de calcul qu'elle nécessite est considérable.

Le code MESSINE (Model for Electromagnetic Simplified Simulation In Non-destructive Evaluation) a pour ambition de disposer d'un modèle physique simplifié rendant bien compte des courants induits.

Ce code repose sur :

- Un volet analytique : avec la résolution analytique des équations différentielles issues des équations de Maxwell. L'avantage de cette méthode est de travailler sur les grandeurs locale du système (potentiel vecteur, champ magnétique, flux et courants induits), mais elle ne permet de modéliser que des configurations assez simples.
- Un volet multi-transformateur : cette méthode consiste à considérer le système capteur/charge comme un système de type transformateur avec :
 - Un inducteur (bobine inductrice du capteur) parcouru par un courant primaire i_b .
 - Un conducteur (charge) composé d'une multitude de secondaires (induits) et parcourus chacun par un courant constant i_q .

Le but recherché est de décrire le capteur (sous forme d'une sonde) et le conducteur comme ensemble de circuit élémentaires caractérisés chacun par sa résistance R_q , inductance L_q et un ensemble de mutuelles d'inductances M_{qp} ($p \neq q$) avec tous les autres circuits élémentaires.

Ces grandeurs ne dépendent que de la forme géométrique des circuits primaires et secondaires. En présence de défauts, la forme géométrique du secondaire est modifiée et la distribution de courants induits dans le conducteur avec défaut est donc différente du cas sans défaut.

Le paramètre de discrétisation (ou nombre de secondaire) joue un rôle important dans la qualité du modèle « multi-transformateur ». en effet les distributions de courant induits dans les conducteurs ne sont pas uniforme.

Le code MESSINE est intéressant dans la création de modèle directe, il s'inscrit aussi dans une optique plus large qui est celle de l'inversion. En effet, l'objectif du modèle inverse est de pouvoir déterminer la nature d'un défaut à partir du signal expérimentale obtenu sur le site.

2.3.2 Description mathématique du modèle MESSINE

Considérons que le système dans un tube (conducteur) est la somme de N spire notés C_q ($q = 1 \dots N$) parcourus chacun par un courant sinusoïdal uniforme i_q (figure.II.8).

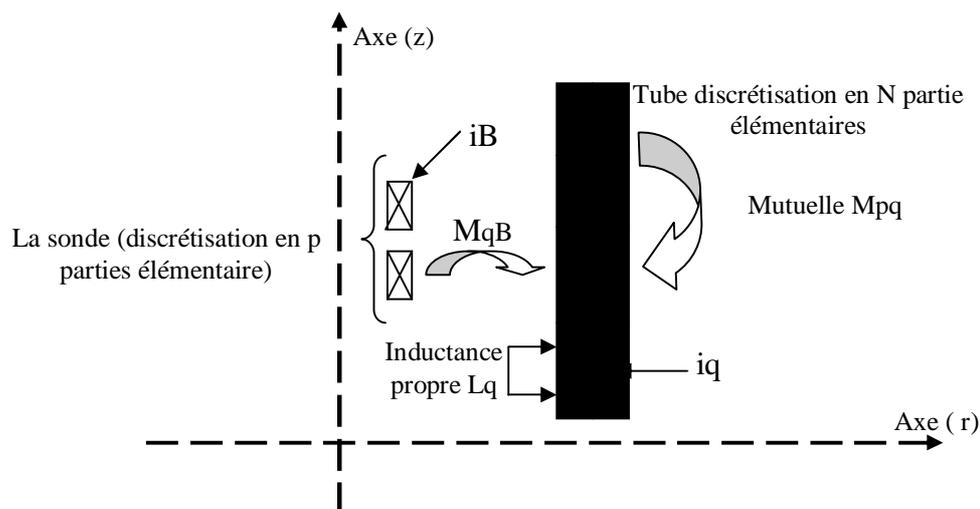


Fig.II.8. *La discrétisation du problème*

Le flux du champ total B à travers une spire C_q du tube est

$$\Phi_q = L_q i_q + \sum_{p \neq q} M_{qp} i_p$$

D'où l'expression de la force électromotrice induite dans la spire C_q :

$$e_q = -\frac{d\Phi_q}{dt} = -j\omega L_q i_q - j\omega \sum_{p \neq q} M_{qp} i_p$$

Or d'après la loi d'ohm : $e_q = R_q i_q$

D'où l'intensité dans la spire C_q :

$$i_q = \frac{-j\omega \sum_{p \neq q} M_{qp} i_p}{R_q + j\omega L_q} \quad q = 1 \text{ à } N.$$

En mettant en exergue l'influence de la bobine excitatrice parcourue par un courant i_B :

$$i_q = \frac{-j\omega M_{qB} i_B - j\omega \sum_{p=1, p \neq q} M_{qp} i_p}{R_q + j\omega L_q} \quad q = 1 \text{ à } N. \quad (\text{II.1})$$

Où :

M_{qB} est l'inductance mutuelle entre la bobine excitatrice et la spire C_q

M_{qp} est l'inductance mutuelle entre C_q et C_p

R_q et L_q sont la résistance et l'inductance propre de C_q

Ceci peut s'écrire (II.1) de façon matricielle :

$$\overline{[Z_{QP}]} \overline{[I_Q]} = -i_B \overline{[M_{QB}]} \quad (\text{II.2})$$

où :

$$\overline{[Z_{QP}]}^T = \begin{bmatrix} R_1 + J\omega L_1 & \dots & j\omega M_{q1} & \dots & j\omega M_{N1} \\ j\omega M_{1q} & \dots & R_q + J\omega L_q & \dots & j\omega M_{Nq} \\ j\omega M_{1N} & \dots & j\omega M_{qN} & \dots & R_N + J\omega L_N \end{bmatrix}$$

Etant donné que les mutuelles M_{ij} et M_{ji} sont égales, la matrice Z_{Qp} est une matrice symétrique.

$$\overline{[M_{QB}]} = \begin{bmatrix} j\omega M_{1B} \\ \cdot \\ j\omega M_{qB} \\ \cdot \\ j\omega M_{NB} \end{bmatrix} \quad \overline{[I_Q]} = \begin{bmatrix} i_1 \\ \cdot \\ i_q \\ \cdot \\ i_N \end{bmatrix}$$

Les courants I_q sont donc solution d'un système linéaire de N équations à N inconnues [15].

2.3.2.1 Le calcul de l'impédance de la bobine

La reconnaissance d'un défaut se fait, en étudiant l'impédance de la bobine. En négligeant la résistance de l'enroulement, la tension aux bornes de la bobine dans le tube s'écrit : $Z = \frac{U}{I}$

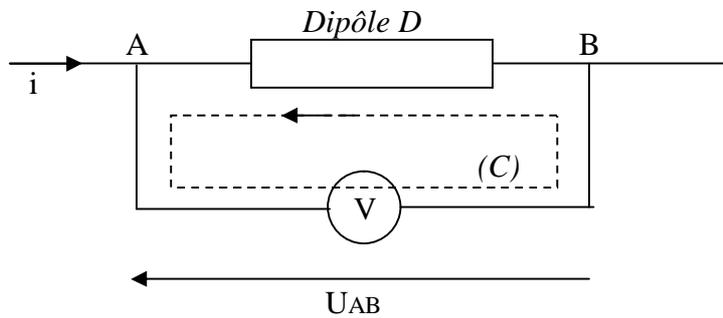


Figure II.9. *Relation entre tension et fem induite*

La loi de Faraday qui lie la f.e.m. induite dans la bobine et le champ magnétique B s'écrit :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad \text{où} \quad \phi(t) = \iint_s \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot dS$$

La relation de Maxwell-Faraday sous forme intégrale donne alors :

$$\oint_c \vec{E} \cdot \vec{dl} = -\iint_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{n} \cdot dS = -\frac{d\phi}{dt}$$

$$\text{D'où : } u = u_{AB} = \int_{AVB} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{ADB} \vec{E} \cdot d\vec{l} - \int_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{ADB} \vec{E} \cdot d\vec{l} + \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{n} \cdot dS$$

$$\text{Soit : } u = \int_{ADB} \vec{E} \cdot d\vec{r} + \frac{d\phi}{dt} = ri + \frac{d\phi}{dt}$$

$$\text{Dans le cas où la bobine est de résistance négligeable : } u_B = \frac{d\phi}{dt} = -e$$

$$u_B = \frac{d\Phi}{dt} = jL_B \omega \cdot i_B + j\omega \sum_{q=1}^N M_{qB} i_q$$

$$\text{d'où } Z = jL_B \omega + j\omega \sum_{q=1}^N M_{qB} \frac{i_q}{i_B} \tag{II.3}$$

Cependant on préfère exprimer une autre grandeur ΔZ qui correspond à la différence de l'impédance de la bobine dans le tube et de l'impédance de la bobine seule dans l'air.

L'impédance de la bobine seule dans l'air s'écrivant $Z_0 = jL_B \omega$, il vient :

$$\Delta Z = Z - Z_0 = j\omega \sum_{q=1}^N M_{qB} \frac{i_q}{i_B} \tag{II.4}$$

C'est l'impédance de détection du tube.

2.3.2.2 Discrétisation et calcul des paramètres

Le but de la discrétisation est de diviser le système en tubes de courant assez fins pour approcher le système réel.

L'hypothèse est que chacun de ces tubes de courant « q » se comporte comme une bobine secondaire de transformateur parcouru par un courant uniforme. Cette bobine 'q' est caractérisée par ses paramètres R_q M_q L_q , ainsi que sa conductivité σ et sa perméabilité magnétique relative μ_r .

En effet si le conducteur a été discrétisé en N parties élémentaires et la sonde (capteur) en p parties élémentaires il faut évaluer (Fig.II.8) :

- N résistance R_q pour le conducteur,
- $N \times P$ mutuelles inductances capteur-conducteur M_{qB} ,
- N inductances propres L_q pour le conducteur,
- $\frac{N(N-1)}{2}$ mutuelles inductances M_{qp} pour le conducteur (la matrice Z_{qp} est symétrique (équation (II.2)).

La majeure partie des calculs consiste dans l'évaluation des mutuelles inductances des parties élémentaires du conducteur. Cependant ce calcul est indépendant de la position du capteur.

2.4 CALCUL ELEMENTS FINIS ET COMPARAISON AVEC MESSINE

La méthode des éléments finis est l'une des techniques d'analyse numérique adaptées à la résolution de l'équation électromagnétique.

Dans le protocole de comparaison entre le calcul éléments finis et calcul MESSINE , on a choisi une sonde ponctuelle sur une plaque, c'est un modèle axisymétrique possédant les caractéristiques suivantes :

Rayon interne (mm)	3
Rayon externe (mm)	3,75
Hauteur de la bobine (mm)	2
Fréquence (Hz)	240000
Courant injecté (par spire) (mA)	4.573
Nombre de spires	328
Perméabilité relative	1
Conductivité de la charge (S/m)	1000000
Epaisseur de la plaque (mm)	1.27
Entrefer (mm)	1

Tab.II.1. *Les caractéristiques physique et géométrique du modèle*

En raison de la symétrie axiale, seule la moitié du domaine sera considérée, et le problème sera ainsi traité sur le plan (r, z) (figure.II.10)

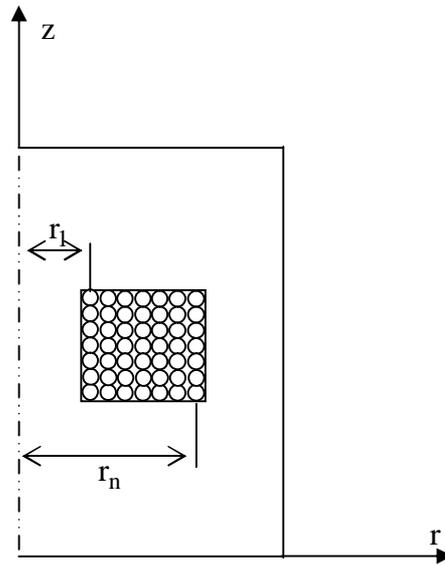


Fig.II.10. Représentation axisymétrique d'une bobine

Nous calculons l'impédance en partant de l'expression de la densité du courant dans une spire.

$$J_1 = -\sigma \text{grad}(V) - \sigma j\omega A_1 \quad (\text{II.5})$$

Sachant que cette spire est caractérisée par sa surface S_{spire} , et son rayon moyen r_{moy} l'expression (II.5) prendra la forme suivante:

$$\frac{I_1}{S_{spire}} = -\sigma \frac{U_1}{2\pi r_1} - \sigma j\omega A_1$$

On peut aussi écrire :

$$U_1 = \frac{2\pi r_1}{\sigma} \frac{I_1}{S_{spire}} - j\omega A_1 2\pi r_1$$

Pour 'nsp' spires, et avec un nombre de discrétisation "k", la tension aux bornes de la bobine s'écrit sous la forme :

$$U_{Tot} = -\frac{2\pi r_{moy}}{\sigma} \frac{nsp I}{S_{spire}} - j\omega 2\pi \left(\frac{nsp}{k}\right) \sum_{m=1}^k r_m A_m \quad (\text{II.6})$$

$$r_{moy} = \frac{(r_{ext} + r_{int})}{2}$$

Sous forme de parties réelle et imaginaire l'équation (II.6) s'écrit encore comme suit :

$$\underline{U} = 2\pi \left(-\frac{nsp r_{moy}}{\sigma S_{spire}} (I_r + jI_j) - j\omega \left(\frac{nsp}{k} \sum_{m=1}^k r_m (jA_{rm} - A_{im}) \right) \right)$$

r_{moy} est le vecteur des rayons moyens de chaque élément de la nappe de courant d'excitation

Pour notre exemple nous utilisons la partie réelle du courant d'excitation..

Finalement l'expression de l'impédance apparente vue par l'inducteur pour un modèle axisymétrique est définie par :

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \left[\underbrace{-\frac{2\pi.r_{moy}.nsp}{\sigma S_{spire}} + \frac{2\pi.\omega.nsp}{I_r k} \sum_{m=1}^k r_m (A_{im})}_R \right] + j \left[\underbrace{-\frac{2\pi.\omega.nsp}{I_r k} \sum_{m=1}^k r_m (A_{rm})}_{LW} \right] \quad (II.7)$$

Nous présentons dans le tableau ci-après les résultats obtenus par la simulation pour l'ensemble bobine ponctuelle-plaque sous environnement Matlab®. en utilisant la méthode des éléments finis et MESSINE.

	Calcul MESSINE	Calcul Eléments finis	Ecart
Résistance R (Ω)	132	163,32	19.18%
Réactance LW (Ω)	969	843,79	12,92%
Impédance Z (Ω)	977.9	859,46	12,11%
$ J _{max}$ (A/m ²)	3,63.10 ⁵	3,57.10 ⁵	1,65%
$ A _{max}$ (T.m)	5,034.10 ⁻⁷	4,807.10 ⁻⁷	4,51%

Tab.II.2 Récapitulatif des résultats

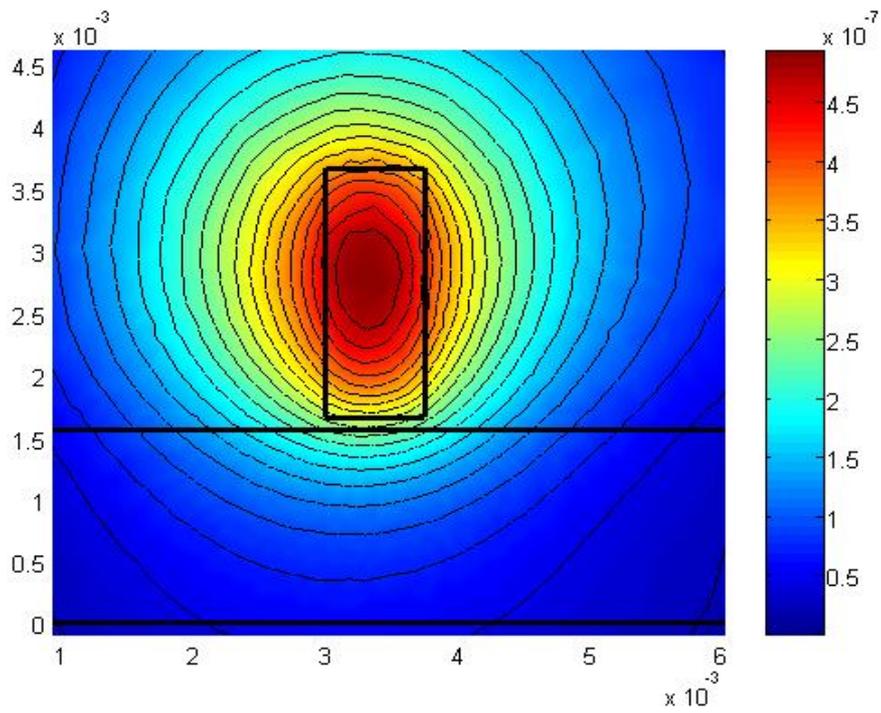


Fig.II.11. Visualisation du module de potentiel vecteur magnétique

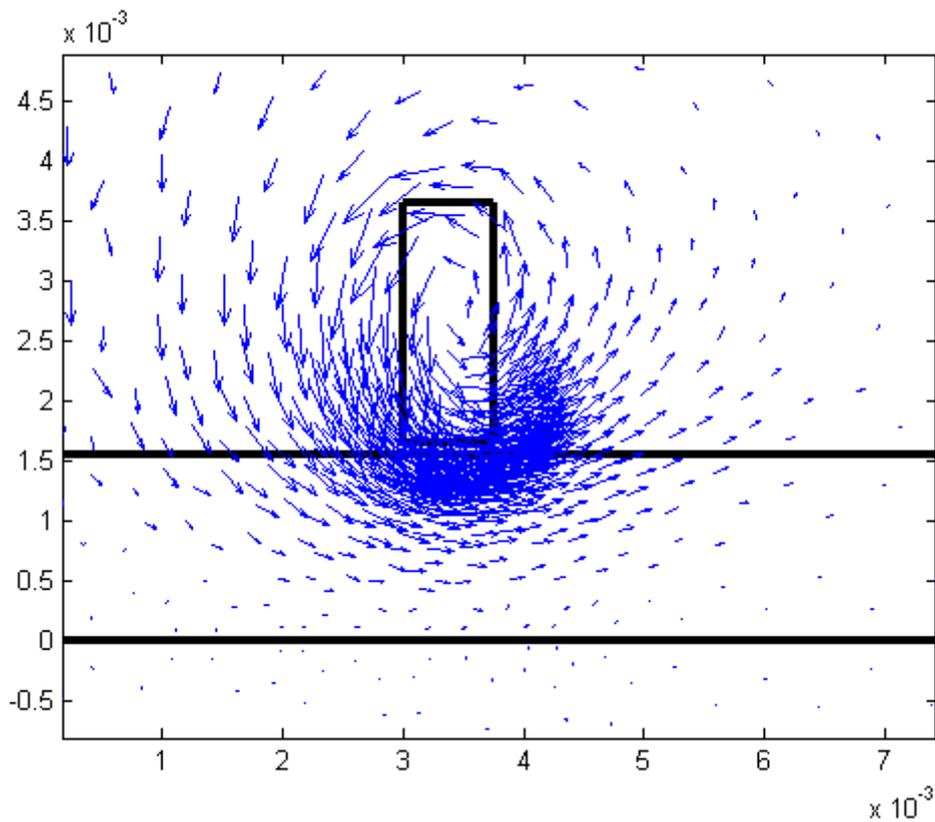


Fig.II.12. Visualisation du vecteur de l'induction magnétique

2.4.1 Comparaison des Impédances

Nous avons calculé les impédances en utilisant l'expression (II.7) pour le calcul EF (le terme statique de la résistance n'est pas pris en compte) et les formules fournies dans le rapport de stage [15] pour le calcul MESSINE. On constate une légère différence entre les valeurs des grandeurs locales, cependant le calcul de l'impédance Z effectuée dans le noyau de calcul MESSINE est en fait une variation d'impédance (équation II.4), ce qui n'est pas le cas de l'impédance fournie par le calcul en éléments finis (équation II.7).

Le code MESSINE permet de calculer l'impédance $Z_{\text{messine}} = Z_b$ qui est l'impédance équivalente d'un bobinage idéal couplé. C'est le circuit idéal dans lequel les impédance de ligne et les capacités parasites ne sont pas prise en compte.

Les temps de calcul MESSINE sont largement diminués par rapport à la méthode des éléments finis (un rapport de 1/4), ceci est valable pour les géométrie simple.

L'interprétation des résultats peut être faite de manière graphique en comparant les courbes Lissajous (en présence d'un défaut) obtenues par éléments finis avec celles par le code MESSINE. Ces courbes sont tracées dans le plan complexe de l'impédance du capteur qui se déplace et découvre un défaut. Le temps de calcul des mutuelles inductances capteur-conducteur conditionne la durée d'une acquisition. Une fois la matrice ZQP (équation II.2) du modèle calculée, il suffit de recalculer la matrice MQB des mutuelles capteur/conducteur pour chacune des positions souhaitées, par contre dans la MEF on doit remailler et modéliser le modèle.

2.5 CONCLUSION

Cette partie recense des principes et des méthodes utilisés actuellement dans le CND par le courant de Foucault.

D'un point de vue pratique, on a constaté que la différence entre le calcul code MESSINE et la MEF est proportionnelle avec la complexité de la géométrie, la nature de défaut, les propriétés physique de la charge...etc.