

MESURE NON DESTRUCTIVE DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DES METAUX FERREUX

LÊ MINH-QUANG, SCIENSORIA
7, rue Ravel F-35170 BRUZ France
tél. : 02 99 57 19 71 fax. : 02 99 57 18 78
e-mail : info@sciensoira.fr, Internet : <http://www.sciensoira.fr>

Résumé – Jusqu'à présent, la mesure non destructive des métaux **ferreux** tels que les fontes d'acier par la méthode des courants de Foucault n'est pas proposée sur le marché. Ceci est dû à la difficulté résultant des caractéristiques magnétiques extrêmement variables des métaux ferreux. Nous avons récemment mis en œuvre un système permettant de s'affranchir de cet obstacle grâce à un logiciel de calcul multi-paramètres et à l'application d'un champ magnétique de polarisation. La mesure non destructive de la conductivité électrique ouvre la voie à d'autres applications très importantes telles que la mesure de l'épaisseur résiduelle des produits en fonte d'acier.

1 Introduction

Les métaux ferreux tels que les diverses nuances d'acier et de fontes d'acier possèdent des caractéristiques magnétique et électrique extrêmement variables, ce qui empêche nombre d'applications du contrôle non destructif par courants de Foucault. A titre d'exemple, aucun instrument commercial n'inclut la mesure de la conductivité électrique par courants de Foucault dans ses applications.

Or, la conductivité électrique peut être très révélatrice sur les paramètres de qualité du produit, tels que sa malléabilité ou sa résistance mécanique.

De plus, la connaissance de la conductivité électrique d'un matériau permet d'accéder à d'autres paramètres très importants, tel que l'épaisseur d'un produit. Pour l'étude de la corrosion interne d'une plaque d'acier par exemple, on peut mesurer aisément sa résistance électrique apparente en y injectant un courant I et en mesurant la chute de tension entre 2 points A et B. La résistance R_{AB} est déterminée par la formule :

$$R_{AB} = \frac{V_{AB}}{I} \quad (1)$$

Cependant, relever la résistance électrique ne donne qu'une indication incomplète de l'état de la corrosion car on ne connaît pas exactement l'épaisseur du produit. En effet, la relation entre la résistance et l'épaisseur est la suivante :

$$R_{AB} = r \frac{L}{S} \quad (2)$$

où ρ est la résistivité du matériau (unité : ohm*mètre), L la longueur du segment AB et S la section du segment AB. Si l'échantillon mesuré est rectangulaire, de hauteur H et de l'épaisseur E, S sera déterminée par la relation $S = H * E$. L'équation (2) devient

$$R_{AB} = r \frac{L}{H * E} \quad (3)$$

Pour déterminer E, il est nécessaire de connaître la résistivité ρ , qui n'est autre que l'inverse de la conductivité électrique σ (unité : siemens/mètre).

Une mesure préalable de la conductivité électrique du matériau s'impose. Cette mesure doit être forcément non destructive.

2 Principe de fonctionnement du contrôle non destructif par courants de Foucault

Le contrôle non destructif par courants de Foucault consiste à soumettre le matériau à un champ magnétique alternatif de fréquence f afin d'y créer des courants de Foucault. Ces courants circulent dans le matériaux et servent de « sondes » : leur intensité dépend des caractéristiques du matériau.

On peut connaître l'état des courants de Foucault grâce au champ magnétique secondaire qu'ils créent. Ce champ peut être mesuré indirectement, à travers l'impédance de la bobine d'excitation, ou directement, grâce à un capteur de champ magnétique.

L'impédance de la bobine d'excitation dépend des caractéristiques de la bobine, de la fréquence du courant d'excitation, et des caractéristiques du matériau sondé tels que sa conductivité électrique, sa perméabilité magnétique, son épaisseur, et du lift-off (distance bobine-cible). Il s'agit d'une fonction multi-paramètres :

$$Z = f(s, m, e, \text{lift-off})$$

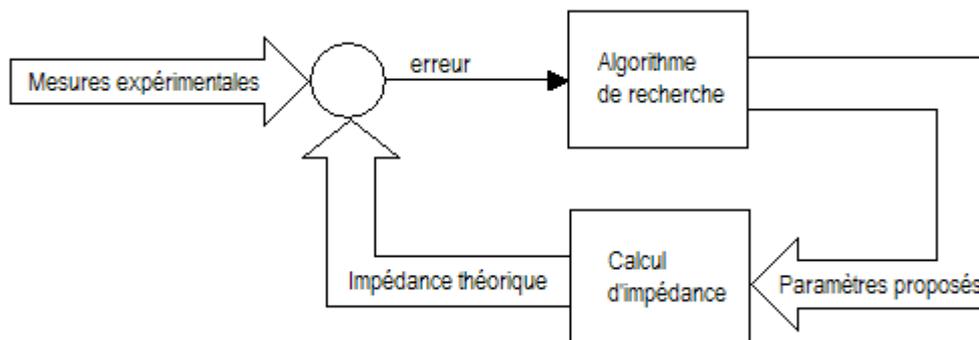
Z est une grandeur complexe, qui comporte une partie réelle R et une partie imaginaire X . En reportant R et X sur 2 axes cartésiens, on obtient le plan d'impédance. En observant l'évolution de R et de X , il est possible de déduire les caractéristiques du matériau contrôlé. Il s'agit de l'analyse de signature. On peut également étalonner les évolutions observées par rapport aux matériaux étalons afin d'élaborer des équations destinées à automatiser l'analyse de signature par des programmes informatiques.

2.1 Eddysens™

Sciensoria commercialise Eddysens™, un logiciel construit autour des équations qui décrivent très précisément le comportement de Z en fonction des paramètres σ , μ , e , lift-off. Eddysens™ permet de simuler rapidement le comportement d'un capteur à courants de Foucault. De plus, ce logiciel est doté d'une fonction importante : il peut calculer les paramètres σ , μ , e , lift-off à partir des données mesurées. Il s'agit de l'inversion de données expérimentales.

Le procédé de l'inversion est itératif : on ajuste les paramètres recherchés jusqu'à ce que les valeurs d'impédance Z calculées soient le plus proches possible des valeurs mesurées expérimentalement. Comme plusieurs paramètres sont à rechercher en même temps, la recherche ne peut être manuelle mais doit suivre des algorithmes précis, ou une combinaison de différents algorithmes.

La figure suivante décrit la recherche itérative des paramètres :



Lorsqu'il y a convergence, les mesures expérimentales sont approchées suffisamment par les valeurs de l'impédance théorique, et les paramètres proposés seront considérés comme proches de ceux du matériau contrôlé. Ceci n'est possible qu'à condition que le calcul d'impédance soit précis et que le capteur soit sensible aux paramètres recherchés.

3 Mise en œuvre d'une mesure non destructive de conductivité électrique par courants de Foucault

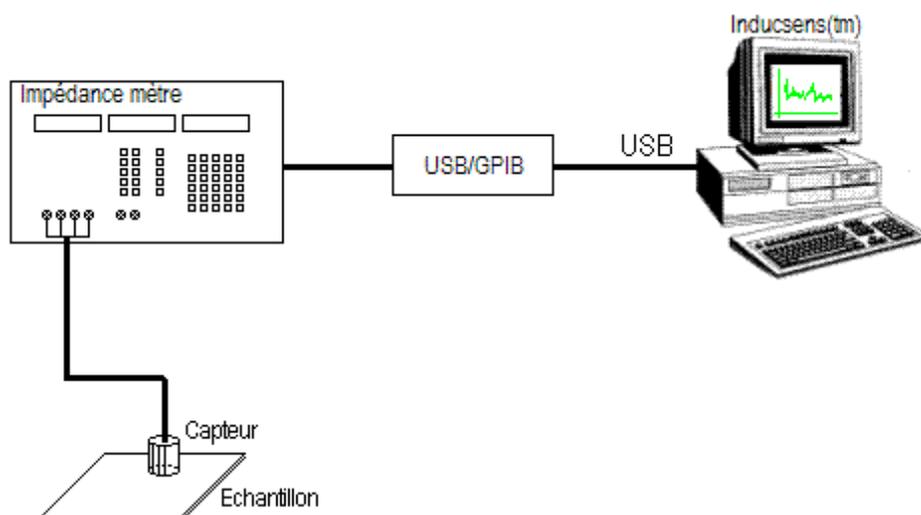
Dans le cas d'une mesure de conductivité électrique d'un échantillon de métal ferreux (fonte d'acier), il y a 4 paramètres en jeu :

- § D'abord, la conductivité électrique à déterminer
- § Les 3 autres paramètres n'ont aucun intérêt : la distance capteur-cible (lift-off), la perméabilité magnétique, l'épaisseur de l'échantillon. Cependant, il faut les déterminer afin de pouvoir compléter les calculs.

L'épaisseur d'un échantillon peut être déterminée manuellement afin d'alléger les calculs. Le lift-off, la perméabilité magnétique peuvent être déterminés par le procédé d'inversion.

En pratique, lorsque la perméabilité magnétique (μ) est grande, l'impédance est très non linéaire par rapport aux paramètres à déterminer. Afin de réduire les non linéarités, le matériau contrôlé est soumis à un champ magnétique externe.

La chaîne d'instrumentation se compose comme ci-dessous :



Les mesures sont effectuées sur des échantillons de fonte d'acier fournis par le groupe Véolia environnement. Ces échantillons proviennent des canalisations du réseau d'eau potable du groupe. Les nuances de fonte d'acier de ces canalisations sont extrêmement variables, ce qui est dû à leurs âges.

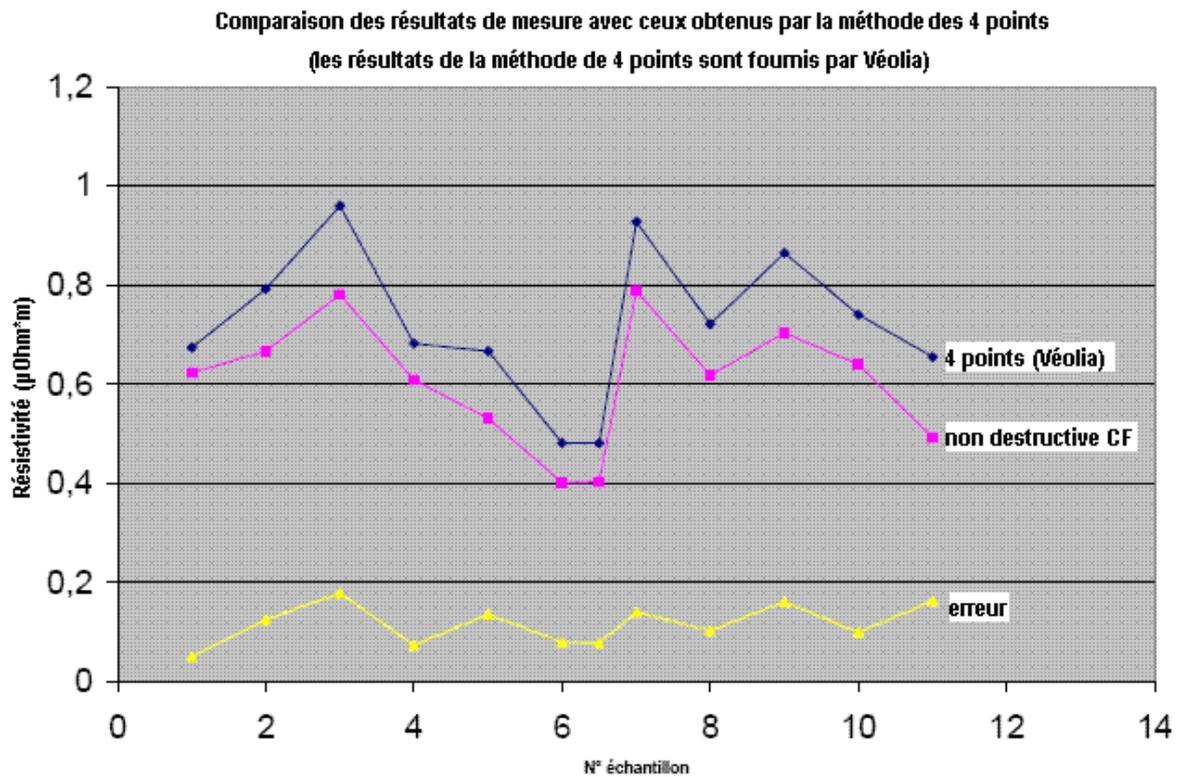
Ces échantillons sont des barreaux d'une vingtaine centimètres de longueur et de 2 centimètres de largeur. Ils ont des épaisseurs variant de 2,5 mm à 4 mm. L'épaisseur de chaque barreau est mesuré manuellement et entré dans Eddysens™ comme paramètre fixe. Les autres paramètres (lift-off et perméabilité magnétique) sont définis comme variables et sont mis à jour à chaque itération.

Il est important de noter qu'aucune correction ou étalonnage n'a été effectué pendant la mesure avec la méthode non destructive. Les données brutes sont directement entrées dans Eddysens™, lequel sort directement des valeurs estimées de paramètres du matériau. Pour un procédé industriel particulier, une correction des erreurs systématiques permettrait d'obtenir des résultats plus précis.

4 Résultat de mesure

La comparaison des valeurs de résistivité (l'inverse de la conductivité électrique) mesurées par Véolia avec la méthode de 4 points traditionnelle et celles mesurées par la méthode non destructive à courants de Foucault est donnée ci-dessous.

Résistivité ($\mu\text{ohm}\cdot\text{m}$)	
Mesurée avec la méthode de 4 points (par Véolia)	Mesurée avec la méthode non destructive à courants de Foucault (Eddysens™)
0,674	0,623
0,792	0,667
0,96	0,780
0,682	0,609
0,667	0,531
0,481	0,401
0,481	0,403
0,928	0,788
0,721	0,618
0,865	0,704
0,74	0,640
0,655	0,492



5 Conclusion

Avec Eddysens™, on peut mesurer sans étalonnage préalable la conductivité électrique des métaux ferreux. Ceci a été possible grâce à la fonction d'estimation multi-paramètres que possède le logiciel, ainsi qu'à l'application d'un champ magnétique externe au matériaux mesurés.

L'expérience a été menée en aveugle, sans information à priori sur les échantillons, et sans étalonnage, ce qui conforte son objectivité et qui démontre son aptitude pour une application industrielle.

La mesure de conductivité par cette méthode non destructive est moins contraignante que la méthode traditionnelle des 4 points car elle ne nécessite pas la préparation d'échantillons filiformes mais uniquement une petite surface. De même, elle ne nécessite pas d'électrodes, ce qui évite les problèmes de mauvais contacts.