

Titre

PROGRES EN EVALUATION NON DESTRUCTIVE QUANTITATIVE PAR COURANTS DE FOUCAULT ASSISTE PAR ORDINATEUR – APPLICATION A LA MESURE D'ÉPAISSEUR ET DE CONDUCTIVITE DES MATERIAUX

Auteurs

LÊ Minh-Quang, Sciensoaria sarl, 7 rue Ravel 35170 BRUZ France mq.le@sciensoaria.fr Internet : www.sciensoaria.fr

Résumé

La méthode des courants de Foucault est l'un des piliers de l'évaluation non destructive des matériaux et des structures. Cette technique permet de mesurer l'épaisseur ou la conductivité électrique, les deux paramètres très importants, mais elle nécessitait une mise en œuvre assez contraignante. Grâce à l'informatisation poussée du processus d'interprétation des signaux, il est désormais possible de mesurer l'épaisseur ou la conductivité électrique sur des configurations inaccessibles auparavant.

Introduction

La technique des courants de Foucault est l'une des techniques principales de contrôle non destructif. Elle permet de détecter des défauts ou de mesurer différents paramètres d'un objet ou une structure (« cible ») en matière conductrice comme les métaux, le graphite ou les composites à fibres de carbone). La technique des courants de Foucault a l'avantage très important de pouvoir fonctionner dans la poussière, en présence d'eau, d'huile, à travers des revêtements ou peinture, et de ne pas nécessiter de liquide couplant comme les ultrasons. La vitesse de contrôle en ligne peut être bien plus élevée que les méthodes concurrentes dans les applications où la comparaison est possible.

Lorsqu'on soumet la cible à un champ magnétique alternatif créé à l'aide d'une bobine d'excitation parcourue par un courant alternatif d'une fréquence appropriée f_0 , des courants induits circulaires s'y développent. Ce sont les courants de Foucault. Ces courants créent à leur tour un champ magnétique secondaire qui sera capté par une sonde disposée près de la surface de la cible. Puisque les courants induits circulent dans la cible, ils portent des indications sur celle-ci : son épaisseur, sa position, sa conductivité électrique, sa perméabilité magnétique, sa géométrie, etc. En captant le champ magnétique secondaire qui est leur image, on peut remonter aux paramètres de la cible. Cette technique pourrait donc avoir plusieurs applications.

Cependant, jusqu'à une période récente, on ne pouvait mesurer qu'un seul paramètre à la fois, en prenant soin de garder tous les paramètres restants constants. Chaque mesure devait être précédée par une étape incontournable : l'étalonnage.

L'étalonnage consiste à mesurer le paramètre en question sur des étalons qui se différencient uniquement par la valeur de ce paramètre, les autres paramètres doivent être rigoureusement identiques. Par exemple, si l'on veut mesurer l'épaisseur d'une plaque en aluminium, on doit faire des mesures d'étalonnage sur les plaques d'épaisseurs différentes mais ayant la même nuance d'aluminium, même forme. De plus, les valeurs d'épaisseur des plaques étalon doivent être régulièrement espacées de sorte que la fonction d'étalonnage puisse être bien établie.

Toutes ces opérations sont assez complexes, coûteuses et nécessitent un opérateur expérimenté.

Lorsqu'il s'agit de contrôle des structures existantes, il est difficile de déterminer exactement la matière utilisée lors de la construction. Si l'on effectue l'étalonnage sur des étalons de matière différente de celle à contrôler, cela engendre inévitablement des erreurs de mesure.

Par ailleurs, si la cible est une surface incurvée, comme c'est le cas des tubes, la courbure du tube et le décentrage de la sonde sur le tube causent des erreurs importantes sur la mesure.

Afin profiter pleinement des atouts de la technique des courants de Foucault sans souffrir de ces inconvénients, Scensoria a mis en œuvre une approche nouvelle. Il s'agit de l'utilisation intensive de l'informatique dans le traitement des signaux multi-fréquences. Nous baptisons cette méthode l'ENDCFAO pour "*Evaluation Non Destructive par Courants de Foucault Assistée par Ordinateur*" (ou CAECNDE : "*Computer Aided Eddy Current Non Destructive Evaluation*").

Cette méthode utilise un balayage en fréquence de la cible et un logiciel informatique qui tient compte de plusieurs paramètres de la cible : son épaisseur, ses paramètres géométriques, sa conductivité électrique, sa perméabilité magnétique, etc.

Description de la méthode ENDCFAO

Traditionnellement, on utilise une seule fréquence d'excitation pour une évaluation non destructive par courants de Foucault (l'ENDCF). Des approches plus modernes ont démontré que l'utilisation de 2 fréquences simultanément donne de meilleurs résultats, notamment en terme de suppression de l'influence d'un autre

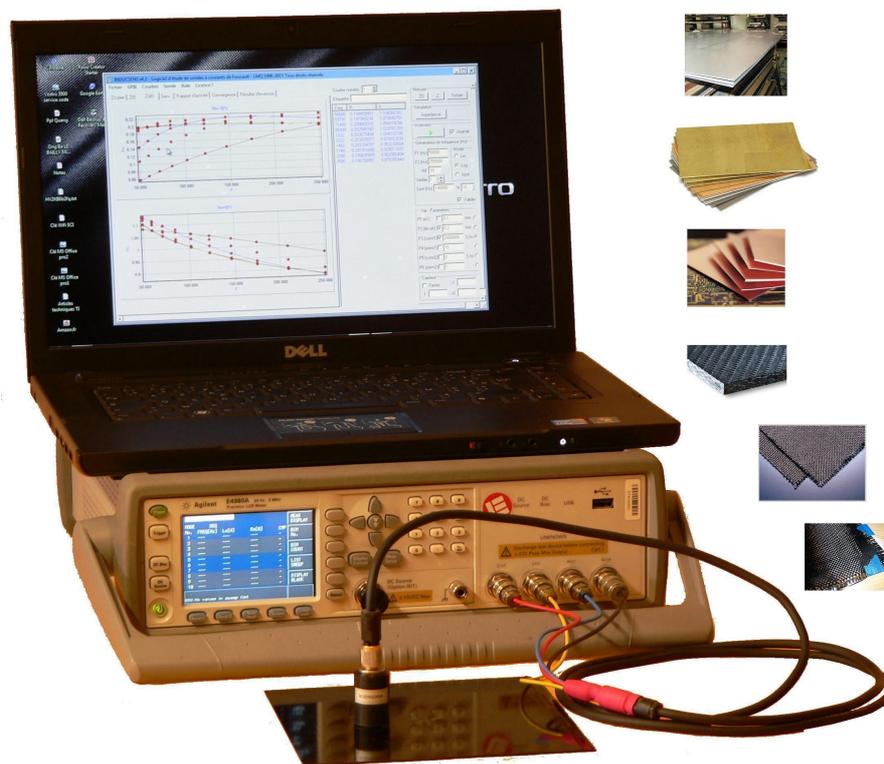
paramètre qui varie en même temps. Cependant, on s'arrêterait souvent à 2 fréquences car limité par la capacité d'interprétation des signaux.

Afin d'exploiter l'approche multi-fréquences de manière optimale, Sciensoria a développé un logiciel capable de prédire précisément le comportement d'une sonde dans tout son domaine fréquentiel. Ainsi, l'interprétation des signaux peut être complètement automatisée et on peut virtuellement utiliser n'importe quel nombre de fréquences. Le choix du nombre de fréquence utilisées et de la plage de balayage est dicté par la loi de l'information afin d'éviter les ambiguïtés d'interprétation des paramètres et de minimiser les incertitudes sur les valeurs estimées.

Suite à un balayage d'une cible en fréquence, les signaux obtenus (parties réelle et imaginaire de la tension de sortie de la sonde à chaque fréquence) sont comparés avec les données prédites par le logiciel. L'ordinateur va ensuite chercher la meilleure combinaison possible des paramètres recherchés (par exemple : épaisseur, largeur d'entrefer ou *lift-off*, conductivité électrique, perméabilité magnétique, etc) qui permette de rapprocher au mieux les données mesurées et les données prédites. Lorsque l'adéquation est jugée maximale, le logiciel arrête la recherche au jeu de paramètres considéré comme « solution ».

Les systèmes Conducens™ et TK-Sens™ de Sciensoria sont construits sur ce principe : ils sont composés d'une sonde « courants de Foucault » (CF) et d'un analyseur d'impédance de précision piloté par un ordinateur sur lequel un logiciel approprié est implanté. La sonde CF est connectée à l'analyseur d'impédance par un câble spécial d'une longueur de plus de 2 m. L'analyseur d'impédance peut être choisi parmi plusieurs modèles proposés par des fabricants connus : Agilent, Hioki, IET-Labs, etc.

Conducens™ est dédié à la mesure de conductivité électrique, alors que TK-Sens™ est dédié à la mesure d'épaisseur.



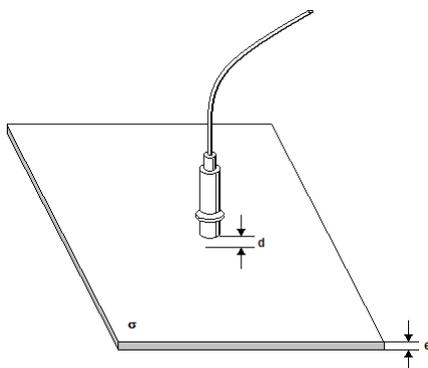
Le système Conducens™ est composé d'une sonde à courants de Foucault, d'un analyseur d'impédance et d'un ordinateur sur lequel un logiciel d'analyse de données est implanté. Longueur câble : 2,3 m.

Capacité de la méthode ENDCFAO

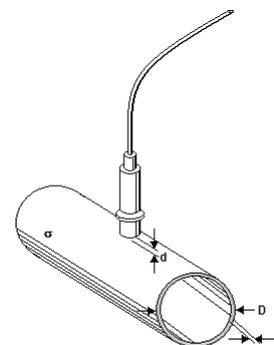
Cette approche permet de révolutionner l'évaluation non destructive par courants de Foucault : elle permet d'éliminer des obstacles technologiques importants et simplifier largement la mise en œuvre des contrôles :

1. Suppression de l'influence de l'entrefer (lift-off) sur la précision de la mesure : l'entrefer a une influence sur le signal bien plus importante que celle de l'épaisseur ou de la conductivité. Traditionnellement, le positionnement de la sonde doit être très précis pour obtenir un signal exploitable. Les systèmes ConducSens™ et TK-Sens™ de Sciensoria mesurent la valeur de l'entrefer et déduisent son effet de l'estimation des autres paramètres, éliminant ainsi la nécessité de fixer la sonde.
2. Suppression de l'influence de l'épaisseur sur une mesure de conductivité : traditionnellement, les appareils de mesure de conductivité doivent être utilisés sur des cibles suffisamment épaisses de sorte que leur épaisseur soit considérée comme infinie. Si l'épaisseur de la cible est insuffisante, il y a une erreur dans l'estimation de la conductivité. Le système ConducSens™ mesure également l'épaisseur en même temps que la conductivité et l'entrefer, éliminant ainsi les fausses interprétations.
3. Suppression de l'influence des variations de la matière sur la mesure d'épaisseur : les appareils de mesure d'épaisseur classiques doivent être étalonnés sur des cales standard avant d'être utilisés sur une cible réelle. S'il y a une différence de matières entre les cales standard et la cible réelle, une erreur de mesure se produit. De même, une erreur peut se produire si la matière de la cible varie d'une pièce à l'autre. Le système TK-SENS™ de Sciensoria peut s'affranchir de cet écueil car il détecte les variations de conductivité et supprime l'effet de ce paramètre dans l'estimation de l'épaisseur.
4. Mesure de conductivité électrique des matériaux ferreux : il n'existait pas d'appareil de mesure de conductivité électrique des métaux ferreux. Ceci est dû à l'impossibilité de fabriquer des cales standard dont les deux paramètres *conductivité électrique* et *perméabilité magnétique* sont connus tous les deux précisément. Ce problème a été contourné grâce à la modélisation mathématique. Grâce au logiciel d'analyse, l'étalonnage sur des cales standard n'est plus nécessaire. Le logiciel est capable de prévoir toutes les combinaisons possibles des paramètres des matériaux et de retrouver la combinaison exacte du matériau étudié.

La possibilité de mesurer la conductivité électrique des matériaux ferreux ouvre de grandes perspectives : ce paramètre doit être déterminé dans de nombreuses applications, telles que le tri d'aciers, ou la caractérisation des matériaux destinés aux machines tournantes, l'évaluation non destructive de l'épaisseur des structures en acier,... tant l'acier est le métal le plus utilisé dans le monde.



Mesure sur plaques (planes ou incurvées)



Mesure sur tubes (ouverts ou fermés)

Exemples d'application de la méthode ENDCFAO

Mesure simultanée de l'épaisseur et de la conductivité électriques de plaques minces sur plaques planes et incurvées

La méthode ENDCFAO permet de mesurer très simplement l'épaisseur d'une plaque métallique de conductivité électrique quelconque. Le matériau peut être un alliage aluminium ou un inox magnétique. Ci-dessous, quelques exemples :

1. Plaque AU4G de nuance 2024, épaisseur 0,5 mm

AU4G est un alliage aluminium très utilisé dans l'aéronautique de par sa légèreté et sa résistance mécanique. Sa conductivité électrique se situe sur la plage de 16MS/m à 20 MS/m.

	Mesurée manuellement	Mesurée par ENDCFAO
Epaisseur	0,5 mm	0,507 mm
	Mesurée par Fischer	Mesurée par ENDCFAO
Conductivité	12,2 MS/m	15 679 075 S/m

Commentaire : la valeur de conductivité mesurée par l'appareil Fischer est bien trop basse par rapport à la documentation technique de l'alliage Au4G 2024. En réalité, la mesure a été faussée par l'épaisseur trop faible de la plaque. La méthode ne s'est pas trompée grâce à sa méthode de balayage en fréquence. Elle a donné simultanément la valeur de l'épaisseur (0,507 mm) et la valeur de la conductivité électrique (≈ 16 MS/m).

2. Plaque inox nuance z10cnt, épaisseur 1,2 mm

	Mesurée manuellement	Mesurée par ENDCFAO
Epaisseur	1,25 mm	1,26 mm
	Mesurée par Fischer	Mesurée par ENDCFAO
Conductivité	Non mesurable	1 264 690 S/m

Commentaire : la conductivité électrique de cette plaque n'a pas été mesurable avec un appareil du commerce (Fischer) car l'épaisseur de la plaque est trop faible par rapport à la profondeur de pénétration du champ magnétique. La méthode ENDCFAO qui utilise le balayage en fréquence a une richesse supérieure en informations et a pu mener à bien la mesure.

3. Morceau de coque d'avion en AU4G

	Mesurée manuellement	Mesurée par ENDCFAO
Epaisseur	3,2 mm	3,24 mm

Commentaire :

- La surface de la cible n'est pas tout à fait plane, la mesure a été effectuée du côté concave (côté extérieur de l'avion).
- ENDCFAO indique de plus la conductivité électrique du matériau, 20.066.805 S/m, et l'entrefer (lift-off), 0,36 mm.

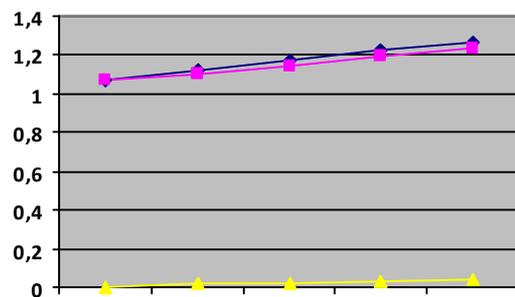
4. Répétabilité de la mesure d'épaisseur

	Plaque Inconel - Epaisseur 1.07 mm	
	Epaisseur estimée (mm)	Conductivité estimée (MS/m)
Mesure 1	1,056	851
Mesure 2	1,092	
Mesure 3	1,062	
Mesure 4	1,06	
Mesure 5	1,062	
Moyenne	1,066	
Ecart type	0,015	

	Plaque Titane - Epaisseur 1.07 mm	
	Epaisseur estimée (mm)	Conductivité estimée (MS/m)
Mesure 1	1,075	578
Mesure 2	1,081	
Mesure 3	1,096	
Mesure 4	1,089	
Mesure 5	1,064	
Moyenne	1,081	
Ecart type	0,012	

5. Linéarité de la mesure d'épaisseur sur plaques en inconel

Mesure épaisseur sur plaques Inconel		
Epaisseur réf. (mm)	Epaisseur mesurée (mm)	Erreur (mm)
1,07	1,066	0,004
1,12	1,098	0,022
1,17	1,147	0,023
1,22	1,191	0,029
1,27	1,231	0,039



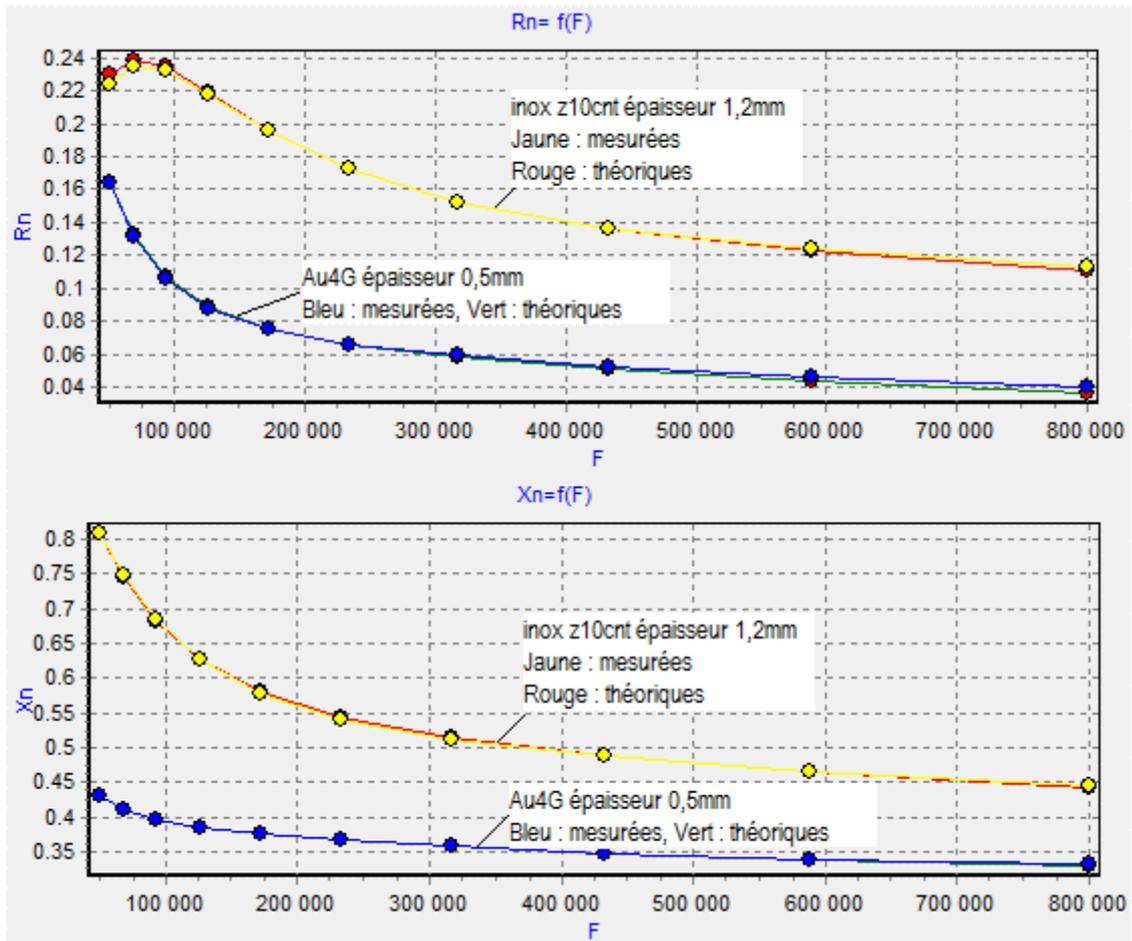
- Courbe rose : valeurs estimées par CF
- Courbe noire : valeurs réelles
- Courbe jaune : erreur de mesure

6. Linéarité de la mesure de distance (lift-off) entre la sonde et une plaque AU4G

Epaisseur de surélévation par ajout de cales d'épaisseur 0,1 mm	Mesure de lift-off sur plaque en AU4G d'épaisseur 0.5 mm			
	Epaisseur estimée (mm)	Erreur en épaisseur (mm)	Lift-off estimée (mm)	Variation en lift-off (mm)
0 cale	0,489	-0,011	0,281	
1 cale	0,477	-0,023	0,387	0,106
2 cales	0,481	-0,019	0,488	0,101
3 cales	0,471	-0,029	0,592	0,104
4 cales	0,468	-0,032	0,694	0,102

7. Adéquation entre les données mesurées et calculées

Le principe de l'ENDCFAO consiste à comparer les données mesurées et prédites par le logiciel d'analyse. L'adéquation entre les 2 types de données, montrée au graphique suivant, démontre la qualité de prédiction de ce logiciel.



Adéquation entre les données mesurées sur les matériaux et les valeurs prédites par le logiciel d'analyse

Mesure de conductivité électrique des matériaux faiblement conducteur

Mesure de conductivité électrique du graphite

Le graphite est un matériau à base de carbone. Il est largement utilisé pour la fabrication d'électrodes (industries métallurgique, chimique, photovoltaïque, etc.) La conductivité du graphite est un sujet très étudié par des laboratoires de recherche. Il est connu que la conductivité électrique du graphite est un paramètre isotrope. Il dépend de la structure cristalline du matériau. Afin de mesurer la conductivité sur les 6 faces d'un cube de graphite, le moyen le plus commode est la mesure par courants de Foucault.



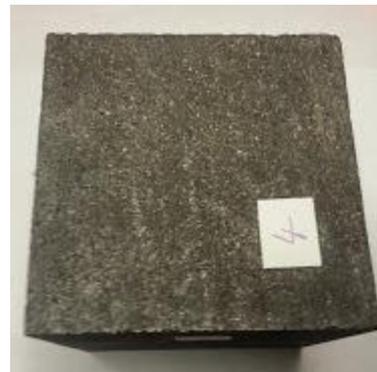
Face 1 : conductivité mesurée = 38 268 S/m



Face 2 : conductivité mesurée = 43 584 S/m



Face 3 : conductivité mesurée = 35 604 S/m



Face 4 : conductivité mesurée = 37 857 S/m



Face 5 : conductivité mesurée = 36 763 S/m



Face 6 : conductivité mesurée = 32 564 S/m

Commentaire : seule la méthode des courants de Foucault permet la mesure de conductivité électrique sur les 6 faces d'un cube de graphite. Avec la méthode de 4 points, il aurait fallu élaborer des barreaux, ce qui détruit la configuration cubique de l'objet.

Mesure de conductivité électrique de matériau composite carbone

Les composites carbone sont l'exemple typique de matériaux hétérogènes. Une plaque de composite carbone est constituée de plusieurs couches de fibres alignées selon différentes directions, le tout relié ensemble par de la résine puis chauffée, séché et compressé.

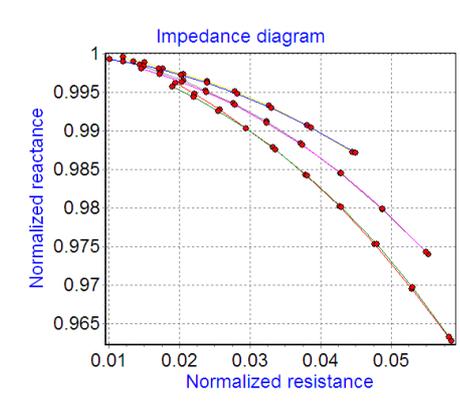
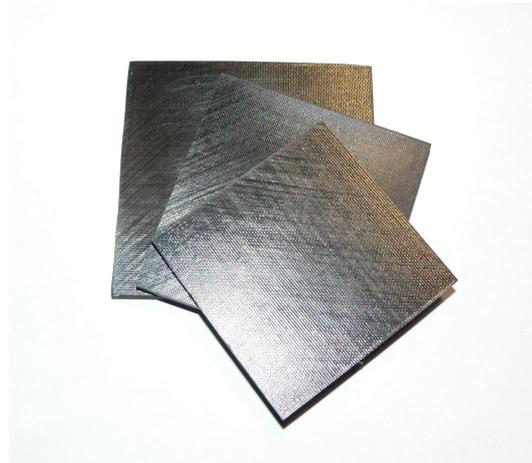
Etant à base de carbone, le matériau présente une certaine conductivité, mais cette conductivité est si faible que jusqu'à une période récente sa mesure par courants de Foucault était impossible. Par ailleurs, l'hétérogénéité du matériau génère des perturbations sur le signal qui sont difficilement interprétables. Il n'est pas possible d'utiliser la méthode de 4-points pour mesurer la conductivité électrique du matériau.

Les 3 plaques présentées sur la droite ont été fabriquées selon un même process mais ont 3 épaisseurs différentes : 2.6 mm, 5 mm et 10 mm.

ENDCFAO donne :

- Pour la plaque de 2.6 mm, la conductivité est estimée à 14,667 S/m
- Pour la plaque de 5 mm, la conductivité est estimée à 14,685 S/m
- Pour la plaque de 10 mm, la conductivité est estimée à 14,810 S/m

Les courbes ci-contre montrent la bonne adéquation entre les données mesurées (courbes rouges) et prédites (courbes vertes).



Commentaire : Malgré la différence en épaisseur, ces plaques possèdent quasiment la même conductivité électrique, ce qui est logique car le process de fabrication est le même.

Mesure de l'épaisseur de paroi de tubes ou de réservoir

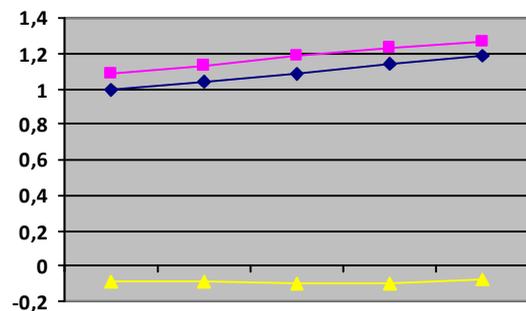
Les tubes et réservoirs sont très présents dans divers domaines de l'industrie. Ils sont soumis aux abrasions ou corrosions d'origine chimique. Le contrôle préventif des tubes et des réservoirs assure qu'aucune fuite de matière toxique ou perte de matière ne se produit.

Un tube ou un réservoir dans une installation est très souvent accessible par l'extérieur uniquement. La seule opération possible consiste à venir sur la paroi externe d'un tube avec une sonde de type « crayon » pour examiner son épaisseur résiduelle.

Ce type de contrôle était uniquement réalisable par les ultrasons. L'utilisation des courants de Foucault était assez difficile à cause des problèmes d'étalonnage. En effet, on connaît mal le matériau constituant le tube ou le réservoir déjà installé, il n'est pas toujours possible de fabriquer des blocs étalon exactement du même matériau que celui à contrôler.

La méthode CNDCAO permet désormais de réaliser ce type de contrôle. En effet, on n'a plus besoin d'étalonner le système de mesure au préalable : l'ordinateur reconnaît automatiquement le matériau et mesure directement l'épaisseur résiduelle. Autre point très important : le système est très peu sensible à la courbure des tubes : il mesure des tubes de diamètre de 20 mm avec une erreur de quelques centièmes de millimètre.

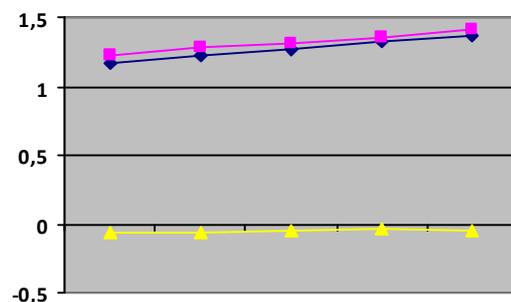
Tubes inconel diamètre 3/4" (19,05 mm)		
Epaisseur réf. (mm)	Epaisseur mesurée (mm)	Erreur (mm)
0,99	1,082	-0,092
1,04	1,131	-0,091
1,09	1,183	-0,093
1,14	1,234	-0,094
1,19	1,267	-0,077



Présentation graphique des données du tableau de gauche :

- courbe rose : valeurs estimées par CF
- courbe noire : valeurs réelles
- courbe jaune : erreur de mesure

Tubes Inconel 7/8" (22,2 mm)		
Epaisseur réf. (mm)	Epaisseur mesurée (mm)	Erreur (mm)
1,17	1,228	-0,058
1,22	1,279	-0,059
1,27	1,317	-0,047
1,32	1,357	-0,037
1,37	1,414	-0,044



Présentation graphique des données du tableau de gauche :

- courbe rose : valeurs estimées par CF
- courbe noire : valeurs réelles
- courbe jaune : erreur de mesure

Il est important de noter que les résultats présentés ci-dessus sont issus de mesures totalement aveugles : aucun étalonnage n'a été effectué. On peut tout à fait améliorer nettement ces résultats en effectuant un étalonnage sur un point : pour ce faire il suffit de trouver un tube étalon dont le diamètre et le matériau sont proches des tubes à mesurer. Il n'est pas nécessaire de prendre exactement le même diamètre et le même matériau. En supprimant l'écart entre la mesure par courants de Foucault et la valeur contrôlée manuellement sur l'étalon, l'erreur de mesure tombe à moins d'un centième de millimètre.

Conclusion

La méthode d'évaluation non destructive par courants de Foucault aidée par l'ordinateur (ENDCFAO) développée par Sciorsoria a ouvert de nouveaux champs d'application très importants dans différents secteurs de l'industrie : énergie, aéronautique, métallurgique, automobile, etc.

L'évaluation quantitative non destructive de l'épaisseur des objets et des structures est rendu possible même pour de faibles courbures et même si l'on ne connaît pas exactement la conductivité électrique du matériau utilisé.

De même, la détermination de la conductivité électrique de plaques minces, de surfaces incurvées, ou de matériaux ferreux, devient réalisable en un temps très court.

L'offre de Sciorsoria est un véritable « multimètre » pour l'évaluation non destructive des structures et des matériaux. Cette offre se présente sous plusieurs formes : livraison de systèmes de mesure clé en main, livraison de sondes et de logiciel pour les clients préférant louer leur impédance-mètre, intégration du logiciel sous forme de composants OEM pour les clients préférant maîtriser leur système à 100%. Contacter Sciorsoria (info@sciorsoria.fr) pour de plus amples détails.

Remerciements

Je remercie MM. J-M. Spinelli, Y. Kernin, E. Longaive de la société Areva pour avoir organisé les essais, mis à disposition des échantillons, traité les résultats de mesure pour Excel, et apporté de précieux conseils.

Bibliographie

1. Eddy Current Testing at Level 2: Manual for the syllabi Contained in iaea-TeCDoC-628.rev. 2 "Training guidelines for non Destructive Testing Techniques" International Atomic Energy Agency, Vienna, 2011 (pdf 5.6 MB).