
**Revêtements métalliques non
magnétiques sur des matériaux de
base métalliques et non métalliques —
Mesurage de l'épaisseur de revêtement
— Méthode par courants de Foucault
sensible aux variations de phase**

*Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis
materials — Measurement of coating thickness — Phase-sensitive
eddy-current method*

iTeh Standards
(<https://standards.iteh.ai>)
Document Preview

ISO 21968:2019

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/6483721e-a3ab-4ea6-9305-272606733f4c/iso-21968-2019>



iTeh Standards
(<https://standards.iteh.ai>)
Document Preview

[ISO 21968:2019](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/6483721e-a3ab-4ea6-9305-272606733f4c/iso-21968-2019)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/6483721e-a3ab-4ea6-9305-272606733f4c/iso-21968-2019>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2019

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, ou la diffusion sur l'internet ou sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8
CH-1214 Vernier, Genève
Tél.: +41 22 749 01 11
Fax: +41 22 749 09 47
E-mail: copyright@iso.org
Web: www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos.....	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	2
4 Principe de mesure	2
5 Facteurs influant sur l'incertitude de mesure	5
5.1 Influence fondamentale de l'épaisseur du revêtement.....	5
5.2 Propriétés électriques du revêtement.....	5
5.3 Géométrie — Épaisseur du matériau de base.....	5
5.4 Géométrie — Effets de bord.....	6
5.5 Géométrie — Courbure de la surface.....	6
5.6 Rugosité de surface.....	6
5.7 Effet d'éloignement.....	6
5.8 Pression de la sonde.....	8
5.9 Inclinaison de la sonde.....	8
5.10 Effets de la température.....	8
5.11 Revêtements intermédiaires.....	8
5.12 Champs électromagnétiques externes.....	8
6 Étalonnage et ajustage de l'instrument	8
6.1 Généralités.....	8
6.2 Étalons de référence d'épaisseur.....	9
6.3 Méthodes d'ajustage.....	9
7 Mode opératoire de mesurage et évaluation	10
7.1 Généralités.....	10
7.2 Nombre de mesurages et évaluation.....	11
8 Incertitude des résultats	11
8.1 Remarques générales.....	11
8.2 Incertitude associée à l'étalonnage de l'instrument.....	12
8.3 Erreurs stochastiques.....	13
8.4 Incertitudes dues aux facteurs récapitulés à l'Article 5.....	13
8.5 Incertitude composée, incertitude élargie et résultat final.....	14
9 Fidélité	14
9.1 Généralités.....	14
9.2 Répétabilité (r).....	14
9.3 Limite de reproductibilité (R).....	16
10 Rapport d'essai	18
Annexe A (informative) Production de courants de Foucault dans un conducteur métallique	19
Annexe B (informative) Principes de base de la détermination de l'incertitude de mesure de la méthode de mesure utilisée correspondant au Guide ISO/IEC 98-3	25
Annexe C (informative) Exigences de performance de base des jauges d'épaisseur de revêtement fondées sur la méthode par courants de Foucault sensible aux variations de phase décrite dans le présent document	27
Annexe D (informative) Exemples d'estimation expérimentale des facteurs qui affectent l'exactitude de mesure	29
Annexe E (informative) Tableau de la variable de Student	35
Annexe F (informative) Exemple d'estimation de l'incertitude	36
Annexe G (informative) Détails relatifs à la fidélité	39

iTeh Standards
(<https://standards.itih.ai>)
Document Preview

[ISO 21968:2019](https://standards.itih.ai/catalog/standards/iso/6483721e-a3ab-4ea6-9305-272606733f4c/iso-21968-2019)

<https://standards.itih.ai/catalog/standards/iso/6483721e-a3ab-4ea6-9305-272606733f4c/iso-21968-2019>

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comité membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir www.iso.org/directives).

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir www.iso.org/brevets).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir le lien suivant: www.iso.org/iso/foreword.html.

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 107, *Revêtements métalliques et autres revêtements inorganiques*.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition (ISO 21968:2005) qui a fait l'objet d'une révision technique. Les principales modifications par rapport à l'édition précédente sont les suivantes:

- le présent document a été adapté aux exigences actuelles du Guide ISO/IEC 98-3 (désigné également comme «GUM:1995»);
- des conseils, d'exemples pratiques et d'estimations simples de l'incertitude de mesure pour les facteurs les plus importants ont été ajoutés;
- une répétabilité et des valeurs de reproductibilité pour les applications types de méthode ont été ajoutées;
- l'annexe a été élargie à des applications supplémentaires et des estimations expérimentales des facteurs qui affectent l'exactitude.

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse www.iso.org/fr/members.html.

Revêtements métalliques non magnétiques sur des matériaux de base métalliques et non métalliques — Mesurage de l'épaisseur de revêtement — Méthode par courants de Foucault sensible aux variations de phase

1 Domaine d'application

Le présent document spécifie une méthode utilisant des instruments fonctionnant par courants de Foucault sensibles aux variations de phase pour le mesurage non destructif de l'épaisseur des revêtements métalliques non magnétiques sur des matériaux de base métalliques et non métalliques, tels que:

- a) le zinc, le cadmium, le cuivre, l'étain ou le chrome sur de l'acier;
- b) le cuivre ou l'argent sur des matériaux composites.

La méthode sensible aux variations de phase peut être appliquée sans erreur d'épaisseur à des surfaces planes plus petites et à des surfaces courbes plus accentuées que la méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude, spécifiée dans l'ISO 2360, et est moins affectée par les propriétés magnétiques du matériau de base. Toutefois, la méthode sensible aux variations de phase est davantage affectée par les propriétés électriques des matériaux de revêtement.

Dans le présent document, le terme «revêtement» est utilisé pour désigner des produits tels que, par exemple, les peintures et vernis, les revêtements électrolytiques, les revêtements en émaux, les revêtements plastiques, les placages et les revêtements en poudre.

Cette méthode s'applique tout notamment au mesurage de l'épaisseur des revêtements métalliques. Ces revêtements peuvent être des revêtements métalliques non magnétiques sur des matériaux de base non conducteurs, conducteurs ou magnétiques, mais aussi des revêtements magnétiques sur des matériaux de base non conducteurs ou conducteurs.

Le mesurage des revêtements métalliques sur des matériaux de base métalliques ne fonctionne que lorsque le produit de la conductivité et de la perméabilité (σ, μ) de l'un des matériaux représente au moins deux fois le produit de la conductivité et de la perméabilité de l'autre matériau. Les matériaux non ferromagnétiques ont une perméabilité relative de un.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 2064, *Revêtements métalliques et autres revêtements inorganiques — Définitions et principes concernant le mesurage de l'épaisseur*

ISO 4618, *Peintures et vernis — Termes et définitions*

Guide ISO/IEC 98-3, *Incertitude de mesure — Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et les définitions de l'ISO 2064, ISO 4618, ainsi que les suivants, s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>

3.1
ajustage d'un système de mesure
ensemble d'opérations réalisées sur un système de mesure pour qu'il fournisse des indications prescrites correspondant à des valeurs données des grandeurs à mesurer

Note 1 à l'article: Divers types d'ajustage d'un système de mesure sont le réglage de zéro, le réglage de décalage et le réglage d'étendue (appelé aussi réglage de gain).

Note 2 à l'article: Il convient de ne pas confondre l'ajustage d'un système de mesure avec l'étalonnage (3.2), qui est une condition préalable à l'ajustage.

Note 3 à l'article: Après un ajustage d'un système de mesure, le système doit généralement être réétalonné.

Note 4 à l'article: Dans le langage courant, le terme «étalonnage» est souvent utilisé, à tort, à la place du terme «ajustage». De même, les termes «vérification» et «contrôle» sont souvent utilisés à la place du terme correct «étalonnage».

[SOURCE: ISO/IEC Guide 99:2007, 3.11 (également connu en tant que «VIM»), modifié — la Note 4 à l'article a été ajoutée.]

3.2
étalonnage
opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication

Note 1 à l'article: Un étalonnage peut être exprimé sous la forme d'un énoncé, d'une fonction d'étalonnage, d'un diagramme d'étalonnage, d'une courbe d'étalonnage ou d'une table d'étalonnage. Dans certains cas, il peut consister en une correction additive ou multiplicative de l'indication avec une incertitude de mesure associée.

Note 2 à l'article: Il convient de ne pas confondre l'étalonnage avec l'ajustage d'un système de mesure (3.1), souvent appelé improprement «auto-étalonnage», ni avec la vérification de l'étalonnage.

Note 3 à l'article: La seule première étape dans la définition est souvent perçue comme étant l'étalonnage.

[SOURCE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.39 (également connu en tant que «VIM»)]

4 Principe de mesure

Les instruments à courants de Foucault sensibles aux variations de phase fonctionnent sur le principe suivant: un champ électromagnétique à haute fréquence, généré par le système de sonde de l'instrument, produira des courants de Foucault dans le revêtement sur lequel est placée la sonde et dans le matériau de base au-dessous du revêtement si celui-ci est conducteur (voir la [Figure 1](#)). Ces courants induits provoquent une variation du champ magnétique autour du système de bobine de la sonde et entraînent par conséquent une variation de l'amplitude et de l'angle de phase de l'impédance de la bobine de la sonde. La densité des courants de Foucault induits est une fonction de l'épaisseur de revêtement, de la conductivité du matériau de revêtement, de la fréquence utilisée du système de sonde et de la conductivité du métal de base. Si l'épaisseur d'un revêtement ayant une conductivité constante est accrue pour une fréquence donnée, le vecteur d'impédance décrit une fonction dite locale

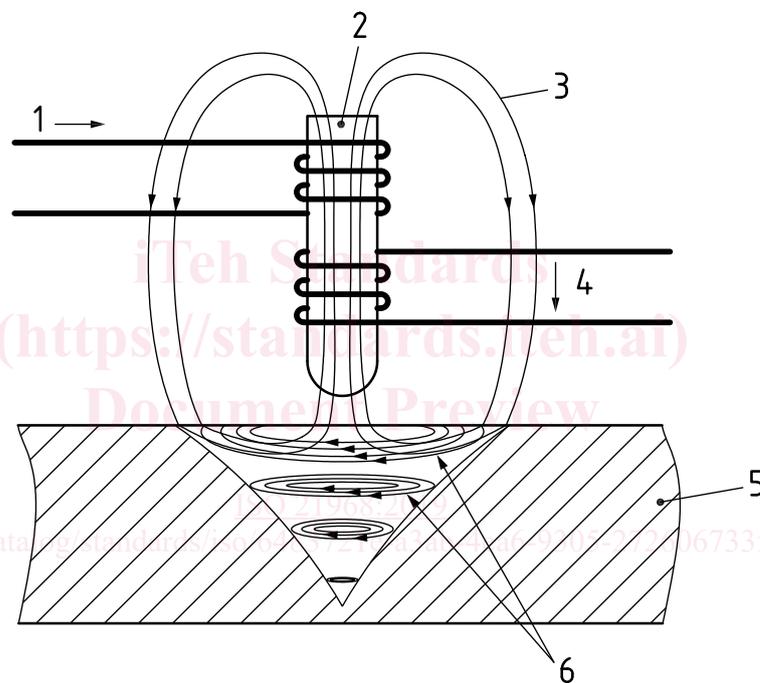
de l'épaisseur dans le plan d'impédance (voir la [Figure 2](#)). Chaque point de cette courbe locale relie un angle de phase du vecteur d'impédance à l'épaisseur de revêtement correspondante. Par conséquent, cet angle d'impédance (déphasage) peut être utilisé comme une mesure de l'épaisseur du revêtement sur le conducteur au moyen d'un étalonnage à l'aide d'étalons de référence (voir également l'[Annexe A](#)).

Afin de mesurer une variation de l'angle de phase de l'impédance de la bobine, la bobine d'essai fait habituellement partie d'un système de bobine et elle est couplée à la bobine d'excitation sur un noyau de ferrite comme dans un transformateur (voir la [Figure 1](#)). Les variations de l'angle de phase et de l'amplitude liées à l'impact des courants de Foucault induits peuvent être mesurées à l'aide d'un amplificateur à verrouillage, par exemple. Ces valeurs sont généralement soumises à un prétraitement par des moyens numériques et l'épaisseur résultante est ensuite calculée et affichée.

La sonde et le système de mesure et d'affichage peuvent être intégrés dans un seul et même instrument.

NOTE 1 L'[Annexe C](#) décrit les exigences de performance de base de l'instrument.

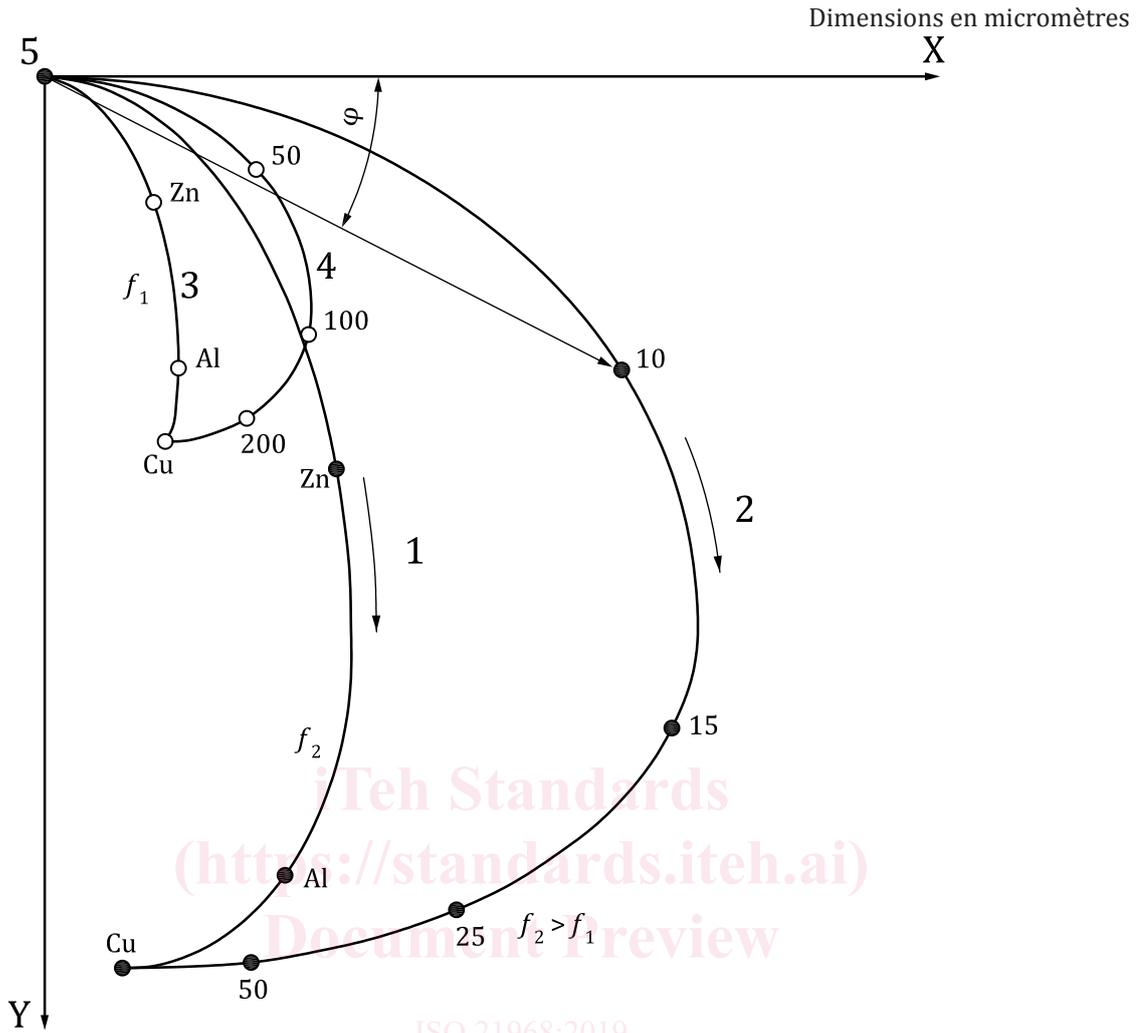
NOTE 2 Les facteurs influant sur l'exactitude de mesurage sont discutés dans l'[Article 5](#).



Légende

- | | | | |
|---|---|---|-----------------------------------|
| 1 | courant d'excitation | 4 | signal mesuré $U = f(t(\varphi))$ |
| 2 | noyau de ferrite de la sonde | 5 | matériau de base (conducteur) |
| 3 | champ magnétique alternatif à haute fréquence | 6 | courants de Foucault induits |

Figure 1 — Méthode par courants de Foucault sensible aux variations de phase



- Légende**
- 1 courbe locale de conductivité pour la fréquence f_2
 - 2 courbe locale d'épaisseur du Cu pour la fréquence f_2
 - 3 courbe locale de conductivité pour la fréquence f_1
 - 4 courbe locale d'épaisseur du Cu pour la fréquence f_1
 - 5 air de la bobine (non affecté)
 - X partie réelle
 - Y partie imaginaire

Figure 2 — Courbe locale d'épaisseur du Cu dans le plan d'impédance normalisé pour les deux fréquences f_1 et f_2

Pour chaque instrument, il y a une épaisseur de revêtement maximale mesurable.

Cette plage d'épaisseur étant fonction de la gamme de fréquences de l'instrument, ainsi que de la conductivité électrique du revêtement, il convient de déterminer l'épaisseur maximale de façon expérimentale, sauf spécification contraire du fabricant.

Une explication de la production des courants de Foucault et du calcul de l'épaisseur maximale mesurable du revêtement, t_{max} est donnée dans l'Annexe A.

Toutefois, en l'absence de toute autre information, l'épaisseur de revêtement maximale mesurable, t_{\max} , peut être estimée à l'aide de la [Formule \(1\)](#):

$$t_{\max} \approx 0,8 \cdot \delta_0 \quad (1)$$

où δ_0 est la profondeur de pénétration conventionnelle du matériau de revêtement (voir l'[Annexe A](#)).

5 Facteurs influant sur l'incertitude de mesure

5.1 Influence fondamentale de l'épaisseur du revêtement

La sensibilité d'une sonde, c'est-à-dire l'effet de mesure, dépend de la fréquence utilisée, de la conductivité du revêtement et du matériau de base, et des propriétés du système de sonde. Outre des propriétés du système de sonde, l'incertitude résultante de l'épaisseur dépend aussi des matériaux de l'échantillon, comme l'homogénéité du revêtement ainsi que la conductivité et la rugosité du matériau de base.

5.2 Propriétés électriques du revêtement

La conductivité du revêtement, ainsi que celle du matériau de base, détermine la densité des courants de Foucault induits pour un système de sonde et une fréquence donnés. Par conséquent, la conductivité du revêtement et du métal de base est à l'origine de l'effet de mesure pour cette méthode. La relation entre l'épaisseur du revêtement et la valeur mesurée dépend dans une large mesure de la conductivité à la fois du revêtement et du matériau de base. Par conséquent, les procédures d'étalonnage et les mesurages doivent être réalisés sur le même matériau. Des matériaux différents ayant des conductivités différentes, de même que des fluctuations locales de la conductivité ou des variations entre différents échantillons, peuvent provoquer un nombre plus ou moins important d'erreurs de lecture de l'épaisseur.

5.3 Géométrie — Épaisseur du matériau de base

Dans le cas d'un matériau de base (métal de base) conducteur, la production de courants de Foucault par le champ magnétique de la bobine dans la profondeur du métal de base est entravée si l'épaisseur du métal de base est trop faible. Cette influence ne peut être négligée qu'au-delà d'une certaine épaisseur minimale critique du métal de base.

Par conséquent, il convient que l'épaisseur du métal de base soit toujours supérieure à cette épaisseur minimale critique du métal de base. Un ajustage de l'instrument peut compenser les erreurs provoquées par un métal de base mince. Néanmoins, toute variation de l'épaisseur du métal de base peut provoquer un accroissement de l'incertitude et des erreurs.

L'épaisseur minimale critique du métal de base dépend à la fois du système de sonde (fréquence, géométrie) et de la conductivité du revêtement et du métal de base. Sauf spécification contraire du fabricant, il convient de déterminer sa valeur expérimentalement.

NOTE Une expérience simple permettant d'estimer l'épaisseur minimale critique du métal de base est décrite dans l'[Annexe D](#).

Toutefois, en l'absence de toute autre information, l'épaisseur minimale requise du métal de base, t_{\min} , peut être calculée à partir de la [Formule \(2\)](#):

$$t_{\min} = 3 \cdot \delta_0 \quad (2)$$

où δ_0 est la profondeur de pénétration conventionnelle dans le métal de base (voir l'[Annexe A](#)).

Dans le cas d'un matériau de base non conducteur et non magnétique, l'épaisseur du matériau de base n'affecte pas les résultats de mesure et il est par conséquent inutile de la considérer comme un facteur d'influence.

5.4 Géométrie — Effets de bord

L'induction des courants de Foucault est entravée par les limites géométriques du revêtement (comme les bords, perçages et autres). De ce fait, les mesurages effectués trop près d'un bord ou d'un angle ne seront valables que si l'instrument a été spécialement ajusté pour ces mesurages. La distance à respecter pour éviter un impact de l'effet de bord dépend du système de sonde (distribution du champ).

NOTE 1 Une expérience simple permettant d'estimer l'effet de bord est décrite dans l'[Annexe D](#).

NOTE 2 Les instruments à courants de Foucault sensibles aux variations d'amplitude tels que décrits dans l'ISO 2360 peuvent être notablement plus affectés par les effets de bord.

5.5 Géométrie — Courbure de la surface

La propagation du champ magnétique, et par conséquent l'induction de courants de Foucault sont affectées par la courbure de la surface du revêtement et du matériau de base. Cette influence est d'autant plus prononcée que le rayon de courbure et l'épaisseur du revêtement sont faibles. Pour réduire au minimum cette influence, il convient d'effectuer l'ajustage sur un échantillon ayant la même géométrie.

L'influence de la courbure de la surface varie considérablement selon la géométrie de la sonde et peut être atténuée en réduisant la surface sensible de la sonde. Les sondes ayant de très petites surfaces sensibles sont souvent appelées «microsondes».

NOTE 1 Il existe des instruments et des sondes capables de compenser automatiquement l'influence de la courbure de la surface de l'échantillon si le diamètre de courbure est connu. Ils peuvent éviter l'erreur sur l'épaisseur résultante.

NOTE 2 Une expérience simple permettant d'estimer l'effet de la courbure de la surface est décrite dans l'[Annexe D](#).

5.6 Rugosité de surface

Les mesurages sont affectés par la topographie de surface du revêtement, mais ils peuvent également être influencés par la topographie de la surface d'un métal de base conducteur. Les surfaces rugueuses peuvent conduire à des erreurs aussi bien systématiques qu'aléatoires. Les erreurs aléatoires peuvent être réduites en effectuant plusieurs mesurages, tous en des endroits différents, puis en calculant la valeur moyenne de cette série de mesurages.

Pour réduire l'influence de la rugosité, il convient d'effectuer un étalonnage avec des pièces de référence ayant une rugosité équivalente à celle de l'échantillon revêtu.

Si nécessaire, il convient que le fournisseur et le client définissent conjointement l'épaisseur moyenne.

NOTE Le mesurage par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude tel que décrit dans l'ISO 2360 peut être davantage affecté par la rugosité du métal de base.

5.7 Effet d'éloignement

Si la sonde n'est pas placée directement sur le revêtement, l'interstice entre la sonde et le revêtement (éloignement) affectera le mesurage de l'épaisseur du revêtement métallique. L'intensité de l'effet d'éloignement dépend de la conception de la sonde et de la géométrie du champ résultant. L'utilisation d'une conception de circuit électronique appropriée et/ou d'un algorithme mathématique approprié de l'instrument permet de compenser cet éloignement pour des interstices allant jusqu'à 1 mm.

L'intensité de l'effet d'éloignement peut être faible avec certaines conceptions de sonde. Dans ce cas, une augmentation de la hauteur d'éloignement se traduit principalement par une réduction de l'amplitude de l'impédance, mais seulement par un petit changement de l'angle de phase en tant que mesure de l'épaisseur (voir la [Figure 3](#)). L'influence peut être compensée par un algorithme mathématique approprié en utilisant l'amplitude mesurée et l'information d'angle de phase.