

Revêtements non conducteurs sur matériaux de base non magnétiques conducteurs de l'électricité

Mesurage de l'épaisseur de revêtement

Méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude

Norme Marocaine homologuée

Par décision du Directeur de l'Institut Marocain de Normalisation N°..... du 2021, publiée au B.O. N° du 2021.

Correspondance

La présente norme est une reprise intégrale de la norme ISO 2360:2017.

Droits d'auteur

Droit de reproduction réservés sauf prescription différente 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 et les microfilms sans accord formel. Ce document est à usage exclusif et non collectif des clients de l'IMANOR, Toute mise en réseau, reproduction et rediffusion, sous quelque forme que ce soit, même partielle, sont strictement interdites.

Avant-Propos National

L'Institut Marocain de Normalisation (IMANOR) est l'Organisme National de Normalisation. Il a été créé par la Loi N° 12-06 relative à la normalisation, à la certification et à l'accréditation sous forme d'un Etablissement Public sous tutelle du Ministère chargé de l'Industrie et du Commerce.

Les normes marocaines sont élaborées et homologuées conformément aux dispositions de la Loi N° 12-06 susmentionnée.

La présente norme marocaine NM ISO 2360 a été examinée et adoptée par la Commission de Normalisation de Chaudronnerie et Menuiserie Métalliques (037).

Projet de norme marocaine

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	3
5.1 Influence fondamentale de l'épaisseur du revêtement.....	3
5.2 Propriétés électriques du métal de base.....	4
5.3 Géométrie: Épaisseur du métal de base.....	4
5.4 Géométrie: Effets de bord.....	4
5.5 Géométrie: Courbure de la surface.....	4
5.6 Rugosité de surface.....	5
5.7 Propreté: Effet de décollement.....	5
5.8 Pression du palpeur.....	5
5.9 Inclinaison du palpeur.....	5
5.10 Effets de la température.....	6
5.11 Revêtements intermédiaires.....	6
5.12 Champs électromagnétiques externes.....	6
6 Étalonnage et ajustage de l'instrument	6
6.1 Généralités.....	6
6.2 Étalons de référence d'épaisseur.....	7
6.3 Méthodes d'ajustage.....	7
7 Mode opératoire de mesurage et évaluation	8
7.1 Généralités.....	8
7.2 Nombre de mesurages et évaluation.....	8
8 Incertitude des résultats	9
8.1 Remarques générales.....	9
8.2 Incertitude associée à l'étalonnage de l'instrument.....	10
8.3 Erreurs stochastiques.....	10
8.4 Incertitudes dues aux facteurs récapitulés à l'Article 5	11
8.5 Incertitude composée, incertitude élargie et résultat final.....	12
9 Fidélité	12
9.1 Généralités.....	12
9.2 Répétabilité (r).....	12
9.3 Limite de reproductibilité (R).....	12
10 Rapport d'essai	13
Annexe A (informative) Production des courants de Foucault dans un conducteur métallique	14
Annexe B (informative) Principes de base de la détermination de l'incertitude de mesure de la méthode de mesure utilisée correspondant à le Guide ISO/IEC 98-3	19
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 d'amplitude décrite dans le présent document	21
Annexe D (informative) Exemples d'estimation expérimentale des facteurs influant sur l'exactitude de mesure	23
Annexe E (informative) Tableau du facteur de Student	28
Annexe F (informative) Exemple d'estimation de l'incertitude (voir Article 8)	29
Annexe G (informative) Détails relatifs à la fidélité	31

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités 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 appelée 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/fr/avant-propos.html

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

Cette quatrième édition annule et remplace la troisième édition (ISO 2360:2003) qui a fait l'objet d'une révision technique.

Revêtements non conducteurs sur matériaux de base non magnétiques conducteurs de l'électricité — Mesurage de l'épaisseur de revêtement — Méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude

1 Domaine d'application

Le présent document spécifie une méthode de mesure non destructive de l'épaisseur des revêtements non conducteurs sur des métaux de base non magnétiques, conducteurs de l'électricité, au moyen d'instruments utilisant les courants de Foucault et sensibles aux variations d'amplitude.

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 est applicable notamment au mesurage de l'épaisseur de la plupart des revêtements d'oxydes produits par anodisation, mais elle ne s'applique pas à toutes les couches de conversion, certaines d'entre elles étant trop minces pour être mesurées par cette méthode (voir [Article 6](#)).

Cette méthode peut également être utilisée pour mesurer des revêtements métalliques non magnétiques sur des métaux de base non conducteurs. Toutefois la méthode par courants de Foucault sensible aux variations de phase spécifiée dans l'ISO 21968 est adaptée en particulier à cette application et peut fournir des résultats de mesure d'épaisseur avec une plus grande exactitude (voir [Annexe A](#)).

Cette méthode ne peut pas être appliquée pour mesurer des revêtements métalliques non magnétiques sur des métaux de base conducteurs. La méthode par courants de Foucault sensible aux variations de phase spécifiée dans l'ISO 21968 est particulièrement utile pour cette application. Cependant, dans le cas particulier des revêtements très minces avec une très faible conductivité, la méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude peut être également utilisée pour cette application (voir [Annexe A](#)).

Bien que la méthode puisse être utilisée pour les mesurages de l'épaisseur des revêtements sur des métaux de base magnétiques, son utilisation pour cette application n'est pas recommandée. Dans ce cas, la méthode magnétique spécifiée dans l'ISO 2178 peut être utilisée. Uniquement dans le cas de revêtements très épais (épaisseur supérieure à environ 1 mm), la méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude peut être également utilisée pour cette application (voir [Annexe A](#)).

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 définitions donnés dans l'ISO 2064 et l'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:

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

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, 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 son étalonnage, qui est un préalable à l'ajustage.

Note 3 à l'article: Après un ajustage d'un système de mesure, le système demande généralement à 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 la même manière, les termes «vérification» et «contrôle» sont souvent utilisés à la place du terme correct «étalonnage».

[SOURCE: Guide ISO/IEC 99:2007, 3.11 (également connue en tant que «VIM»)]

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

4 Principe de mesure

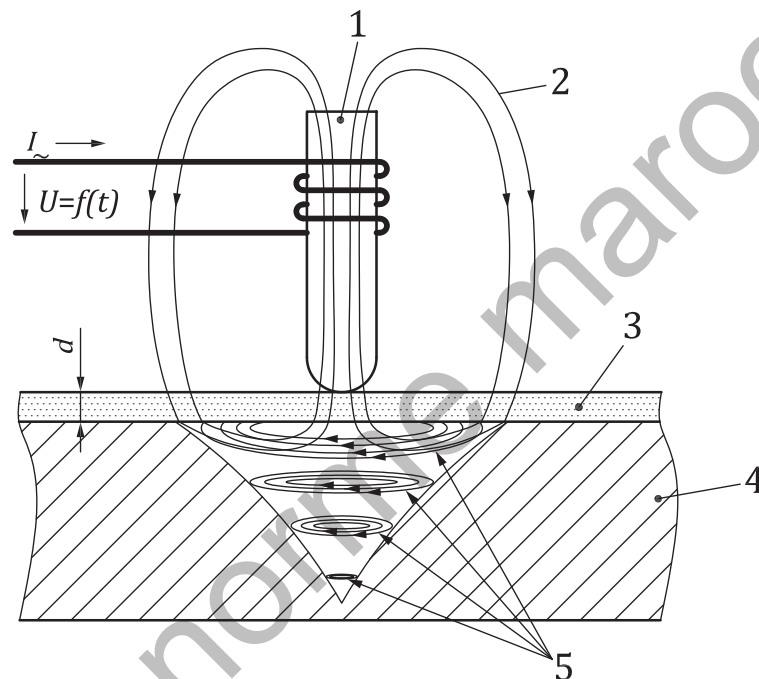
Les instruments à courants de Foucault fonctionnent sur le principe qu'un champ électromagnétique à haute fréquence, engendré par le système de palpeur de l'instrument, produit des courants de Foucault dans le métal de base au-dessous du revêtement sur lequel est placé le palpeur (voir [Figure 1](#)). Ces courants induits provoquent une variation du champ magnétique autour de la bobine du palpeur et entraînent par conséquent une variation d'amplitude dans l'impédance de la bobine du palpeur. La densité des courants de Foucault induits est une fonction de la distance entre la bobine génératrice et la surface du métal de base. Par conséquent, cette variation d'impédance peut être utilisée 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 d'amplitude dans l'impédance de la bobine, la bobine d'essai fait habituellement partie d'un circuit d'oscillation avec une fréquence de résonance déterminée par l'inductance et la résistance de la bobine. Une variation d'amplitude dans l'impédance de la bobine entraîne un décalage de la fréquence de résonance. Par conséquent, la fréquence de résonance mesurée est une mesure de l'épaisseur de revêtement. Les valeurs sont soit prétraitées par des moyens numériques, soit directement affichées sur une jauge convenablement graduée.

Le palpeur 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'équipement.

NOTE 2 Les facteurs influant sur l'exactitude de mesurage sont discutés dans l'Article 5.



Légende

1	noyau en ferrite du palpeur	5	courants de Foucault induits
2	champ électromagnétique à haute fréquence	I_{\sim}	courant d'excitation
3	revêtement non conducteur	t	épaisseur du revêtement
4	métal de base	$U = f(t)$	signal de mesure

Figure 1 — Méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude

5 Facteurs influant sur l'incertitude de mesure

5.1 Influence fondamentale de l'épaisseur du revêtement

La sensibilité d'un palpeur, c'est-à-dire l'effet de mesure, diminue lorsque l'épaisseur augmente dans les limites de l'étendue de mesure du palpeur. Dans la partie inférieure de l'étendue de mesure, cette incertitude de mesure est constante (en valeur absolue) et indépendante de l'épaisseur du revêtement. La valeur absolue de cette incertitude dépend des propriétés du système de palpeur et des matériaux échantillons, par exemple l'homogénéité de la conductivité du métal de base, la rugosité du métal de base et la rugosité de surface de l'échantillon. Dans la partie supérieure de l'étendue de mesure, l'incertitude devient approximativement une fraction constante de l'épaisseur du revêtement.

5.2 Propriétés électriques du métal de base

La conductivité du métal de base détermine la densité des courants de Foucault induits pour un système de palpeur et une fréquence donnés. Par conséquent, la conductivité 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 du métal 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.

NOTE Il existe des instruments et des palpeurs capables de compenser automatiquement l'influence de la conductivité du métal de base, évitant ainsi l'erreur sur l'épaisseur résultante.

5.3 Géométrie: Épaisseur du métal de base

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 du système de palpeur (fréquence, géométrie) et de la conductivité 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 en [D.3](#).

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 \(1\)](#).

$$t_{\min} = 3 \cdot \delta_0 \quad (1)$$

où, δ_0 est la profondeur de pénétration normale dans le métal de base (voir [A.1](#)).

5.4 Géométrie: Effets de bord

L'induction des courants de Foucault est entravée par les limites géométriques du métal de base (par exemple bords, trous percés 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 palpeur (distribution du champ).

NOTE 1 Une expérience simple permettant d'estimer l'effet de bord est décrite en [D.2](#).

NOTE 2 Comparée à la méthode par courants de Foucault sensible aux variations de phase de l'ISO 21968, la méthode employant des instruments à courants de Foucault sensibles aux variations d'amplitude peut être affectée de façon plus prononcée 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 métal 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 métal de base ayant la même géométrie.

L'influence de la courbure de la surface varie considérablement selon la géométrie du palpeur et peut être atténuée en réduisant la surface sensible du palpeur. Les palpeurs ayant de très petites surfaces sensibles sont souvent appelés micropalpeurs.

NOTE 1 Il existe des instruments et des palpeurs capables de compenser automatiquement l'influence de la courbure de la surface du métal de base, évitant ainsi l'erreur sur l'épaisseur résultante.

NOTE 2 Une expérience simple permettant d'estimer l'effet de la courbure de la surface est décrite en [D.4](#).

5.6 Rugosité de surface

Les mesurages sont affectés par la topographie de surface du métal de base et du revêtement. 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 un métal de base non revêtu ayant une rugosité équivalente à celle de l'échantillon de métal de base revêtu.

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

NOTE Comparée à la méthode par courants de Foucault sensible aux variations de phase de l'ISO 21968, la méthode de mesure employant des instruments à courants de Foucault sensibles aux variations d'amplitude peut être affectée de façon plus prononcée par la rugosité du métal de base.

5.7 Propreté: Effet de décollement

Si le palpeur n'est pas placé directement sur le revêtement, l'interstice entre le palpeur et le revêtement (décollement) affectera le mesurage comme s'il y avait un revêtement supplémentaire. Le décollement peut être provoqué non intentionnellement par la présence de petites particules entre le palpeur et le revêtement. La propreté de la pointe du palpeur doit être vérifiée fréquemment.

5.8 Pression du palpeur

La pression qu'exerce le palpeur sur l'éprouvette peut affecter la lecture de l'instrument et doit toujours rester constante pendant l'ajustage et les mesurages.

L'influence de la pression du palpeur est plus prononcée dans le cas de revêtements mous car la pointe du palpeur peut s'enfoncer dans le revêtement. Par conséquent, il convient que la pression du palpeur soit aussi faible que possible. La plupart des instruments disponibles dans le commerce sont équipés de palpeurs à ressort qui assurent une pression constante lors de la mise en place. Lorsque le palpeur n'est pas muni d'un ressort, il convient d'utiliser un dispositif auxiliaire approprié.

NOTE 1 La pression de contact et la profondeur d'enfoncement de la pointe du palpeur peuvent être réduites en diminuant la force appliquée ou en utilisant une pointe de palpeur de grand diamètre.

NOTE 2 L'enfoncement de la pointe du palpeur dans des revêtements mous peut être réduit en plaçant une feuille de protection d'une épaisseur connue sur la surface revêtue. Dans ce cas, l'épaisseur du revêtement est l'épaisseur mesurée moins l'épaisseur de la feuille. Ce mode opératoire n'est pas applicable au mesurage de revêtements métalliques non magnétiques sur des matériaux de base non conducteurs.

5.9 Inclinaison du palpeur

Sauf indication contraire de la part du fabricant, le palpeur doit être placé perpendiculairement à la surface du revêtement car toute inclinaison de celui-ci par rapport à la perpendiculaire peut entraîner des erreurs de mesurage.

Le risque d'inclinaison involontaire du palpeur peut être minimisé à la conception ou en utilisant un support de palpeur approprié.

NOTE La plupart des instruments disponibles dans le commerce sont équipés de palpeurs à ressort assurant un positionnement perpendiculaire à la surface de l'échantillon.

5.10 Effets de la température

Du fait que les changements de température modifient les caractéristiques du palpeur, il convient d'utiliser le palpeur dans des conditions de température sensiblement identiques à celles de l'étalonnage de l'instrument.

NOTE 1 L'influence des variations de température peut être réduite par une compensation de température du palpeur. Les spécifications du fabricant sont prises en compte.

NOTE 2 Des écarts de température entre le palpeur, l'électronique de l'instrument, l'environnement et l'échantillon peuvent provoquer des erreurs importantes de mesurage de l'épaisseur. Le mesurage de l'épaisseur de revêtements chauds est un exemple.

La conductivité électrique de la plupart des métaux varie en fonction de la température. Étant donné que l'épaisseur du revêtement mesurée est affectée par les variations de la conductivité électrique du métal de base, il convient d'éviter les variations importantes de température (voir [5.2](#)).

5.11 Revêtements intermédiaires

La présence d'un revêtement intermédiaire peut affecter le mesurage de l'épaisseur du revêtement si les caractéristiques électriques de ce revêtement intermédiaire diffèrent de celles du revêtement ou du métal de base. S'il existe une différence, les mesurages seront, en outre, affectés si l'épaisseur du revêtement intermédiaire est inférieure à t_{\min} . Si l'épaisseur est supérieure à t_{\min} , le revêtement intermédiaire, s'il est non magnétique, peut être traité comme le métal de base (voir [5.3](#)).

5.12 Champs électromagnétiques externes

Les résultats de mesure peuvent être influencés par de puissants champs électromagnétiques parasites. En cas de résultats inattendus ou d'une forte variation des résultats ne pouvant pas être expliquée par d'autres facteurs, il convient de tenir compte de cette influence. Dans cette situation, il convient d'effectuer un mesurage comparatif à un emplacement exempt de champs parasites.

6 Étalonnage et ajustage de l'instrument

6.1 Généralités

Avant utilisation, chaque instrument doit être étalonné ou ajusté conformément aux instructions du fabricant au moyen d'étalons de référence d'épaisseur appropriée et d'un métal de base. Il convient que le matériau, la géométrie et les propriétés de surface du métal de base utilisé pour l'étalonnage ou l'ajustage soient similaires à ceux des éprouvettes afin d'éviter les écarts dus aux facteurs décrits à [l'Article 5](#). Sinon, ces influences doivent être prises en compte dans l'estimation de l'incertitude de mesure.

Pendant l'étalonnage ou l'ajustage des instruments, il convient que les étalons et le métal de base aient la même température que les éprouvettes afin de réduire au minimum les écarts induits par la température.

Pour éviter l'influence d'une dérive de l'instrument, il est recommandé d'effectuer des mesurages de contrôle périodiques avec des étalons de référence ou des échantillons de contrôle. L'instrument doit, si nécessaire, être réajusté.

NOTE La plupart des instruments s'ajustent automatiquement grâce à une fonction appelée «étalonnage» activée par l'opérateur; en revanche, le résultat de l'étalonnage n'est souvent pas évident.

6.2 Étalons de référence d'épaisseur

Les étalons de référence d'épaisseur pour l'étalonnage et l'ajustage sont soit des métaux de base revêtus, soit des feuilles placées sur des métaux de base non revêtus.

Les feuilles et les revêtements doivent être non conducteurs et non magnétiques. Les valeurs d'épaisseur des étalons de référence et les incertitudes associées doivent être connues et documentées sans ambiguïté. L'aire pour laquelle ces valeurs sont valables doit être indiquée. Il convient que les valeurs d'épaisseur puissent être reliées à des étalons de référence certifiés.

Les incertitudes doivent être documentées avec leur niveau de confiance, par exemple U (95 %) qui signifie qu'il y a une probabilité de 95 % au minimum pour que la valeur «vraie» se situe dans l'intervalle d'incertitude consigné autour de la valeur d'épaisseur documentée.

Avant utilisation, les feuilles et les revêtements doivent être contrôlés visuellement afin de détecter tout dommage ou usure mécanique susceptible de fausser l'ajustage et provoquer ainsi un écart systématique de toutes les valeurs mesurées.

Dans la plupart des cas, les feuilles sont en matière plastique. Contrairement à la méthode magnétique (voir l'ISO 2178), les matériaux conducteurs, par exemple les alliages de cuivre, ne peuvent pas être utilisés dans de telles feuilles car ils peuvent induire des courants de Foucault. Ils affecteraient le mesurage et provoqueraient des erreurs d'épaisseur.

NOTE La situation est «inversée» lors du mesurage de revêtements métalliques non magnétiques sur des matériaux de base non conducteurs.

L'avantage d'utiliser comme étalons de référence des feuilles plutôt que des métaux de base revêtus choisis résulte de la possibilité de placer les feuilles directement sur chaque métal de base. L'influence de la géométrie et d'autres facteurs d'influence sont déjà pris en compte dans l'ajustage.

Néanmoins, lorsque le palpeur est appliqué sur les feuilles, une déformation élastique ou plastique peut se produire et affecter le résultat de mesure. Par ailleurs, tout interstice entre le pôle du palpeur, la feuille et le métal de base doit être évité. La pression généralement faible exercée par le manchon de guidage à ressort du palpeur peut être insuffisante pour garantir l'absence d'interstice, notamment pour des éprouvettes concaves ou lorsque la feuille est froissée ou pliée.

La possible déformation élastique, voire plastique, de la feuille de référence dépend de la force appliquée par le palpeur et du diamètre de la pointe du palpeur (voir 5.9). Par conséquent, il convient d'étalonner ces feuilles de référence en utilisant des valeurs comparables de force appliquée et de diamètre de pointe afin d'éviter des écarts d'enfoncement pendant l'étalonnage du palpeur. De cette manière, les erreurs d'enfoncement respectives sont déjà prises en compte dans la valeur d'épaisseur de la feuille, c'est-à-dire que cette valeur peut être inférieure à l'épaisseur géométrique non affectée. Il convient que les valeurs de force appliquée et de diamètre de pointe utilisées lors de l'étalonnage de la feuille soient communiquées par le fabricant de la feuille de référence de sorte que les éventuelles erreurs sur l'épaisseur puissent être estimées.

6.3 Méthodes d'ajustage

L'ajustage des jauges d'épaisseur de revêtement est effectué en plaçant les palpeurs sur une pièce de métal de base non revêtu et/ou une ou plusieurs pièces de métal de base revêtu ayant une épaisseur de revêtement connue. Selon le type d'instrument, les instructions du fabricant et l'étendue de mesure de l'instrument utilisé, des ajustages peuvent être effectués sur les éléments suivants:

- a) une pièce de métal de base non revêtu;
- b) une pièce de métal de base non revêtu et une pièce de métal de base revêtu avec une épaisseur de revêtement définie;
- c) une pièce de métal de base non revêtu et plusieurs pièces de métal de base revêtu avec des épaisseurs de revêtement définies, mais différentes;

- d) plusieurs pièces de métal de base revêtu avec des épaisseurs de revêtement définies, mais différentes.

Selon [6.2](#), le terme «métal de base revêtu» inclut les feuilles placées sur un métal de base non revêtu.

Les méthodes d'ajustage indiquées peuvent conduire à différents niveaux d'exactitude des résultats de mesure. Il convient donc d'utiliser la méthode qui s'adapte le mieux à l'application considérée et permet d'obtenir l'exactitude souhaitée. L'incertitude de mesure qui peut être atteinte par les différentes méthodes d'ajustage dépend de l'algorithme d'évaluation des jauges ainsi que du matériau, de la géométrie et de l'état de surface des étalons et des métaux de base à mesurer. Si l'exactitude souhaitée n'est pas atteinte par une méthode, une autre méthode d'ajustage peut conduire à de meilleurs résultats. En général, il est possible de réduire l'incertitude de mesure en augmentant le nombre de points d'ajustage et en faisant en sorte que ces points couvrent mieux et plus étroitement l'intervalle d'épaisseur attendu du revêtement à mesurer.

NOTE 1 Le processus utilisé pour adapter le palpeur à un métal de base donné en plaçant le palpeur sur le métal de base non revêtu est souvent appelé «mise à zéro» ou «étalonnage du point zéro». Toutefois, cette procédure est encore un «ajustage» ou une partie d'un processus d'ajustage tel que défini dans le présent document.

NOTE 2 Selon le nombre de pièces de métal de base revêtu et non revêtu utilisé pour ajuster l'instrument, la méthode d'ajustage correspondante est souvent appelée «ajustage en un point», «ajustage en deux points» ou «ajustage multipoints».

L'incertitude de mesure résultant d'un ajustage de l'instrument ne peut pas être généralisée à l'ensemble des mesurages ultérieurs. Dans chaque cas, tous les facteurs d'influence spécifiques et supplémentaires doivent être pris en considération de façon détaillée (voir [Article 5](#) et [Annexe D](#)).

NOTE 3 Certains types de jauges permettent de rétablir l'ajustage initial du fabricant de l'instrument. Cet ajustage est valable uniquement pour les étalons de référence non revêtus ou revêtus du fabricant. Lorsque ces étalons ou les mêmes types d'étalons sont utilisés pour vérifier l'instrument après une période d'utilisation, toute détérioration de la jauge et des palpeurs, par exemple une usure du palpeur par abrasion du pôle de contact, peut être détectée par l'observation d'écarts dans les résultats de mesure.

7 Mode opératoire de mesurage et évaluation

7.1 Généralités

Chaque instrument doit être utilisé conformément aux instructions du fabricant, en tenant compte notamment des facteurs influant sur l'exactitude de mesure mentionnés à [l'Article 5](#).

Avant d'utiliser l'instrument et après toute modification influant sur l'exactitude de mesure (voir [Article 5](#)), l'ajustage de l'instrument doit être vérifié.

Pour s'assurer que l'instrument mesure correctement, il doit être étalonné à l'aide d'étalons valides sur le lieu de contrôle chaque fois que:

- a) l'instrument est mis en service;
- b) le matériau et la géométrie des éprouvettes sont modifiés; ou
- c) d'autres conditions de contrôle dont les effets ne sont pas connus sont modifiées (par exemple température).

Étant donné que les modifications des conditions de mesurage et leurs influences sur l'exactitude de mesure ne peuvent pas toutes être constatées immédiatement (par exemple dérive, usure du palpeur), il convient d'étalonner l'instrument à intervalles réguliers pendant l'utilisation.

7.2 Nombre de mesurages et évaluation

Il convient de déterminer l'épaisseur du revêtement comme la moyenne arithmétique de plusieurs valeurs individuelles mesurées dans une aire définie de la surface du revêtement. Outre la moyenne,

il convient de consigner l'écart-type dans le rapport (voir [Annexe B](#)). La composante aléatoire de l'incertitude de mesure peut être réduite en augmentant le nombre de mesurages. Sauf spécification ou accord contraire, il est recommandé de mesurer au moins cinq valeurs individuelles (selon l'application).

NOTE 1 Il est possible de calculer le coefficient de variation V à partir de l'écart-type. V correspond à l'écart-type relatif (par exemple en pourcentage) et permet de comparer directement l'écart-type pour les différentes épaisseurs.

NOTE 2 La dispersion totale du mesurage est composée de la dispersion de l'instrument lui-même et de la dispersion due à l'éprouvette. L'écart-type dû à l'opérateur et au palpeur dans la gamme d'épaisseurs mesurées est déterminé par des mesurages répétés au même emplacement, en utilisant si nécessaire un dispositif auxiliaire pour positionner le palpeur.

Lorsque le mesurage est effectué sur des surfaces de revêtement rugueuses ou sur des éprouvettes présentant de forts gradients d'épaisseur connus (par exemple en raison de leurs dimensions et/ou de leur forme), il convient que la cause des écarts entre les mesures individuelles soit déterminée par une série de mesurages.

8 Incertitude des résultats

8.1 Remarques générales

Une évaluation complète de l'incertitude de l'épaisseur mesurée doit être effectuée conformément à le Guide ISO/IEC 98-3. Les principes de base de l'expression de l'incertitude sont résumés dans l'[Annexe B](#) et un exemple type de ce calcul est décrit dans l'[Annexe F](#).

L'incertitude du résultat de mesure de l'épaisseur est une combinaison d'incertitudes résultant d'un grand nombre de sources différentes. Les sources importantes qu'il convient de prendre en considération comprennent ce qui suit:

- a) incertitude associée à l'étalonnage de l'instrument;
- b) influences stochastiques affectant le mesurage;
- c) incertitudes dues aux facteurs récapitulés à [l'Article 5](#);
- d) autres influences, dérives, effets de la numérisation et autres effets.

Toutes les composantes d'incertitude doivent être estimées et additionnées pour obtenir l'incertitude-type composée comme décrit dans le Guide ISO/IEC 98-3; voir l'[Annexe B](#).

Une procédure pouvant être utilisée pour l'estimation de l'incertitude est décrite dans la méthode simplifiée suivante (voir [8.2](#) à [8.5](#)).

Les composantes d'incertitude individuelles des sources énumérées dépendent des mesurages concernés, des propriétés des échantillons mesurés, de l'instrument, des conditions ambiantes, etc. et peuvent présenter de grandes différences pour des applications différentes. Par conséquent, les composantes d'incertitude individuelles doivent être estimées de façon détaillée pour chaque mesurage. La qualité de l'incertitude est déterminée par la qualité de l'estimation de l'ensemble des composantes d'incertitude. L'omission de composantes se traduit par des estimations incorrectes de l'incertitude et donc des résultats d'épaisseur incorrects.

Les facteurs énumérés à [l'Article 5](#) peuvent notamment aboutir à des valeurs d'incertitude élevées et il convient si possible de réduire leur influence par un ajustage.

NOTE Outre la nécessité d'exprimer l'incertitude dans le résultat, l'analyse des composantes d'incertitude possibles fournit des informations détaillées permettant d'améliorer le mesurage.

8.2 Incertitude associée à l'étalonnage de l'instrument

En l'absence de toute autre information, l'incertitude actuelle d'un instrument peut être estimée dans une gamme d'épaisseurs limitée en réalisant n mesurages répétés sur un étalon de référence donné ayant une épaisseur t_r et une incertitude U_r ($k = 2$) connues. Le résultat de mesure est la valeur moyenne arithmétique \bar{t}_m des valeurs d'épaisseur mesurées avec l'écart-type $s(t_m)$. La qualité de l'étalonnage est déterminée par le rapport E entre la différence obtenue $|\bar{t}_m - t_r|$ et l'incertitude composée du mesurage d'étalonnage. Cette incertitude (dénominateur de E , $k = 2$) est considérée comme étant due à l'erreur stochastique du mesurage avec n répétitions (comparer avec 8.3) et l'incertitude-type de référence donnée U_r . Lorsque $E \leq 1$, l'étalonnage est valable et ne peut pas être amélioré au moyen de cet étalon de référence, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de faire la distinction entre la différence et l'incertitude. Par conséquent, l'incertitude-type de l'étalonnage u_{cal} ($k = 1$) est donnée par l'incertitude composée du mesurage de vérification, mais par rapport au niveau sigma de 1 ($k = 1$).

Toutefois, lorsque $E > 1$, un écart significatif de l'étalonnage dans les limites de l'incertitude est détecté et il convient d'effectuer un ajustage de l'instrument afin d'améliorer l'exactitude de l'étalonnage.

Voir les [Formules \(2\)](#) et [\(3\)](#):

$$E = \frac{|\bar{t}_m - t_r|}{2 \times u_{cal}} \quad (2)$$

$$u_{cal} = \sqrt{\left[t(68,27\%, n-1) \times \frac{s(t_m)}{\sqrt{n}} \right]^2 + [0,5 \cdot U_r]^2} \quad (3)$$

NOTE 1 Lorsque la tolérance T de l'étalon de référence est donnée au lieu de U_r , c'est-à-dire ($t_r \pm T$), par exemple dans le certificat d'un matériau de référence certifié, l'incertitude-type correspondante (pour un niveau de confiance de 68,3 %) peut être calculée par $U_r = \frac{T}{\sqrt{3}}$ et l'incertitude élargie (pour un niveau de confiance de 95,4 %) par $U_r (k = 2) = 1,653 \times \frac{T}{\sqrt{3}}$. L'écart par rapport au facteur habituel de 2 pour une loi normale est dû au fait que les tolérances suivent des distributions rectangulaires.

L'incertitude de l'étalonnage u_{cal} est valable uniquement dans une gamme étroite d'épaisseurs autour de t_r . Lorsque la gamme d'épaisseurs étudiée est plus étendue, il convient d'estimer l'incertitude u_{cal} des deux côtés de la gamme d'épaisseurs. L'interpolation linéaire entre les deux valeurs donne l'incertitude d'intérêt en fonction de l'épaisseur.

Très souvent, l'exactitude de l'étalonnage est limitée par l'incertitude donnée de l'étalon de référence, car l'incertitude associée à l'étalonnage ne peut pas être inférieure à l'incertitude de l'étalon de référence utilisé. Pour améliorer l'étalonnage, il est nécessaire d'utiliser un étalon de référence ayant une plus faible incertitude.

En général, une normalisation ou une mise à zéro sur un métal de base non revêtu est recommandée par le fabricant au début d'un mesurage. L'incertitude associée à cette normalisation est considérée comme étant déjà incluse dans u_{cal} .

NOTE 2 $t(68,27\%, n-1)$: facteur de Student (degrés de liberté $f = n - 1$ et niveau de confiance avec $p = 68,27\%$). Les valeurs correspondantes sont indiquées dans l'[Annexe E](#).

8.3 Erreurs stochastiques

En général, des mesurages répétés sont recommandés pour améliorer l'exactitude de la valeur moyenne arithmétique, \bar{t} , des valeurs d'épaisseur mesurées (voir 7.2), c'est-à-dire pour réduire l'incertitude du

résultat d'épaisseur. Dans le cas de n mesurages répétés, l'incertitude-type, u_{sto} ($k = 1$), de la moyenne arithmétique, \bar{t} , peut être estimée à l'aide de la [Formule \(4\)](#) (type A):

$$u_{sto} = t(68,27\%, n-1) \times \frac{s(t)}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

L'incertitude-type, u_{sto} , est une mesure de toutes les erreurs résultant de variations temporelles et spatiales imprévisibles ou stochastiques de grandeurs d'influence.

NOTE 1 L'incertitude-type, u_{sto} , peut être réduite en augmentant le nombre de mesurages répétés. Cela peut être important, par exemple dans le cas de surfaces d'échantillon rugueuses.

NOTE 2 Les contributions à l'incertitude, u_{sto} , ne sont pas toutes de nature aléatoire (type A). Cela dépend du dispositif expérimental. Par exemple, l'épaisseur mesurée d'un échantillon de grandes dimensions ayant un gradient d'épaisseur se traduit par une incertitude élevée, u_{sto} , en raison de la variation systématique d'épaisseur. Lorsque l'aire de mesure est réduite, u_{sto} est réduite et la valeur moyenne arithmétique, \bar{t} , donne une meilleure description de l'épaisseur locale.

Il convient de pallier le risque que des incertitudes-types de type B (voir [8.4](#)), susceptibles de contribuer aux incertitudes-types de type A, ne soient pas prises en compte deux fois.

8.4 Incertitudes dues aux facteurs récapitulés à l'Article 5

Chaque fois que cela est possible, il convient de réduire au minimum l'influence des facteurs récapitulés à l'Article 5 au moyen d'un ajustage. Très souvent, ces influences peuvent uniquement être estimées et l'incertitude qui en résulte doit être prise en compte comme une composante de l'incertitude composée associée au mesurage. Des expériences simples permettant d'estimer l'incertitude associée à certains de ces facteurs sont décrites dans l'Annexe D. En général, l'influence de ces facteurs, et donc les incertitudes qui en résultent, sont fonction de l'épaisseur. Par conséquent, pour estimer l'incertitude pour une épaisseur donnée ou au moins pour une gamme étroite d'épaisseurs, les expériences doivent être réalisées avec des échantillons ayant l'épaisseur considérée.

Par exemple, la variation des propriétés de conductivité du métal de base est prise en compte (variation de la conductivité). Comme décrit en [D.5](#), il convient d'estimer la variation attendue pour l'épaisseur considérée. Il convient que la variation d'épaisseur résultante par rapport au métal de base choisi soit $\Delta t_{bm} = \text{abs}(t_{\min} - t_r)$ or $\Delta t_{bm} = \text{abs}(t_{\max} - t_r)$. On obtient ainsi l'incertitude-type due à la variation des propriétés du métal de base $u_{bm}(k = 1)$, comme indiqué dans la [Formule \(5\)](#):

$$u_{bm} = \frac{\Delta t_{bm}}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

La même estimation de l'incertitude-type doit être effectuée pour tous les facteurs pertinents énumérés à l'Article 5. Par exemple, en cas de variation attendue de la courbure de la surface se traduisant par Δt_{cs} selon [D.4](#), l'incertitude-type peut être estimée comme $u_{cs}(k = 1)$, comme indiqué dans la [Formule \(6\)](#):

$$u_{cs} = \frac{\Delta t_{cs}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Lorsque l'influence d'un facteur est réduite au minimum par un ajustage, l'incertitude résiduelle doit être prise en compte.

Certains des facteurs influant sur l'exactitude peuvent être réduits au minimum en utilisant des feuilles souples comme étalons de référence, par exemple les propriétés du métal de base ([5.3](#)) ou la courbure de la surface ([5.5](#)), à condition que l'étalonnage soit effectué en appliquant des feuilles sur un métal de base ayant les mêmes caractéristiques en termes de matériau et de courbure que l'échantillon étudié. Dans ce cas, seules les variations attendues des propriétés de l'échantillon doivent être prises en compte.

8.5 Incertitude composée, incertitude élargie et résultat final

L'incertitude composée récapitule toutes les composantes de l'incertitude-type (8.2, 8.3, 8.4 et d'autres éventuellement). Dans la méthode simplifiée décrite, lorsque l'on estime les incertitudes pour une épaisseur donnée ou une gamme très étroite d'épaisseurs, les coefficients de sensibilité peuvent être considérés comme étant égaux à 1 (voir [Annexe B](#)). Cela donne l'incertitude composée, u_c , comme indiqué dans la [Formule \(7\)](#):

$$u_c = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{sto}^2 + u_{bm}^2 + u_{cs}^2 + \dots} \tag{7}$$

L'incertitude élargie $U(k = 2)$ est calculée en tant que résultat final (niveau sigma de 2, 95,45 %) comme indiqué dans la [Formule \(8\)](#):

$$U(k = 2) = 2u_c \tag{8}$$

Et le résultat complet du mesurage avec la valeur d'épaisseur, \bar{t} , est calculé comme indiqué dans la [Formule \(9\)](#):

$$t = \bar{t} \pm U(k = 2) \tag{9}$$

9 Fidélité

9.1 Généralités

Pour de plus amples informations sur la détermination de la fidélité, voir l'[Annexe G](#).

9.2 Répétabilité (r)

La répétabilité, r , est la valeur à laquelle ou au-dessous de laquelle est située, avec une probabilité de 95 %, la valeur absolue de la différence entre deux résultats d'essai obtenus dans des conditions de répétabilité (conformément à l'ISO 5725-1:1994, 3.16). La limite de répétabilité, r , conformément au présent document et calculée avec une probabilité de 95 %, est indiquée dans le [Tableau 1](#).

Tableau 1 — Limite de répétabilité (r)

Épaisseur du revêtement µm approx.	Limite de répétabilité du premier point de mesure (triple mesurage)	Limite de répétabilité des cinq points de mesure
	r_{x1} µm	$r_{\bar{x}}$ µm
12	1,0	1,0
25	1,7	2,3
125	2,7	12,5

9.3 Limite de reproductibilité (R)

La limite de reproductibilité, R , est la valeur à laquelle ou au-dessous de laquelle est située, avec une probabilité de 95 %, la valeur absolue de la différence entre deux résultats d'essai obtenus dans des conditions de reproductibilité (conformément à l'ISO 5725-1:1994, 3.20). La limite de reproductibilité, R , conformément au présent document et calculée avec une probabilité de 95 %, est indiquée dans le [Tableau 2](#).

Tableau 2 — Limite de reproductibilité (R)

Épaisseur du revêtement	Limite de reproductibilité du premier point de mesure (triple mesurage)	Limite de reproductibilité des cinq points de mesure
$\mu\text{m approx.}$	R_{x_1} μm	$R_{\bar{x}}$ μm
12	– a	– a
25	5,0	5,3
125	6,0	13,0

^a Aucun calcul de la reproductibilité R_{x_1} et $R_{\bar{x}}$ n'a pu être effectué pour un seul échantillon.

10 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit contenir les informations suivantes:

- toutes les informations nécessaires pour l'identification de l'éprouvette;
- une référence au présent document, avec son année de publication, c'est-à-dire: ISO 2360:2017;
- la superficie des zones d'essai sur lesquelles les mesurages ont été effectués, en millimètres carrés (mm^2);
NOTE D'autres unités de mesure peuvent être utilisées sur accord entre le fournisseur et le client.
- l'emplacement de la (des) zone(s) d'essai sur chaque éprouvette;
- le nombre d'éprouvettes mesurées;
- une identification de l'instrument, du palpeur et des étalons utilisés pour l'essai, y compris la référence à toute certification de validation de l'instrument.
- les résultats d'essai consignés en termes d'épaisseurs mesurées, en micromètres, pour chaque zone sur laquelle l'essai a été réalisé, comprenant les résultats des mesurages ponctuels ainsi que leur moyenne arithmétique;
- le nom de l'opérateur et du laboratoire d'essais;
- tout élément inhabituel observé et toute circonstance ou toute condition susceptible d'affecter les résultats ou leur validité;
- tout écart par rapport à la méthode spécifiée;
- la date de l'essai.

Annexe A (informative)

Production des courants de Foucault dans un conducteur métallique

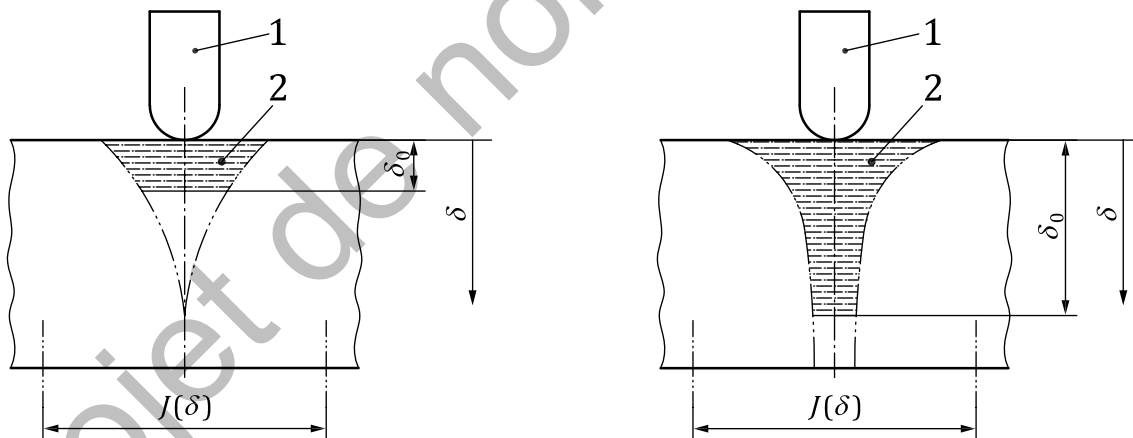
A.1 Généralités

Les instruments à courants de Foucault fonctionnent selon le principe qu'un champ électromagnétique à haute fréquence, engendré par le système de palpeur de l'instrument, produit des courants de Foucault dans un conducteur électrique sur lequel est placé le palpeur. Ces courants de Foucault induits provoquent une variation du champ électromagnétique autour de la bobine du palpeur et entraînent par conséquent une variation d'amplitude et/ou de phase dans l'impédance de la bobine du palpeur, qui peut servir à mesurer l'épaisseur du revêtement sur le conducteur (voir A.2 et A.5) ou du conducteur lui-même (voir A.3 et A.4).

La production de courants de Foucault dans un conducteur métallique est illustrée à la [Figure 1](#).

La valeur de la densité des courants de Foucault, $J(\delta)$, varie de façon proportionnelle à l'éloignement, δ , par rapport à la surface du conducteur (profondeur). À la profondeur δ_0 (profondeur de pénétration normale), le champ électromagnétique et par suite la densité de courant chutent à $\frac{J(\delta_0)}{J(0)} = \frac{1}{e}$.

En principe, cette profondeur de pénétration normale est déterminée par la conductivité de l'échantillon ainsi que par la perméabilité et la fréquence de la bobine du palpeur; voir la [Figure A.1](#).



a) haute fréquence et/ou conductivité élevée

b) basse fréquence et/ou faible conductivité

Légende

1 palpeur

2 courants de Foucault

δ_0 profondeur de pénétration normale

δ profondeur

$J(\delta)$ densité

Figure A.1 — Représentation schématique illustrant l'influence de la fréquence et de la conductivité sur la profondeur de pénétration normale

La profondeur de pénétration normale, δ_0 , est une valeur utile pour certaines estimations brutes importantes. Elle peut être calculée, en millimètres, à l'aide de la [Formule \(A.1\)](#):

$$\delta_0 = \frac{503}{\sqrt{f \times \sigma \times \mu_r}} \times F_p \quad (\text{A.1})$$

où

f est la fréquence, en hertz, à laquelle fonctionne le palpeur;

σ est la conductivité électrique du conducteur, en mégasiemens par mètre;

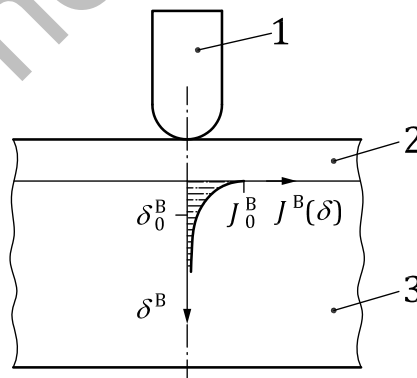
μ_r est la perméabilité relative du conducteur (pour les matériaux non magnétiques $\mu_r = 1$)

F_p est un coefficient de correction déterminé par la géométrie du palpeur.

La méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude est la mieux adaptée pour le mesurage des revêtements non conducteurs sur des métaux de base non magnétiques (voir [A.2](#)) mais également pour le mesurage des revêtements métalliques non magnétiques nus sur des métaux de base non conducteurs (voir [A.3](#)). La méthode par courants de Foucault sensible aux variations de phase (voir l'ISO 21968) est la mieux adaptée pour le mesurage des revêtements métalliques non magnétiques sur des matériaux de base métalliques ou non métalliques (voir [A.2](#) et [A.3](#)), notamment si le revêtement métallique doit être mesuré à travers une peinture ou sans contact, par exemple lorsqu'une compensation du «détachement» est nécessaire.

A.2 Exemple 1: Revêtement non conducteur sur un métal de base conducteur

Dans le cas considéré, la densité de courant est uniquement dépendante de la distance entre le palpeur et le métal de base, c'est-à-dire de l'épaisseur du revêtement (voir [Figure A.2](#)). Une épaisseur de revêtement importante donne lieu à une interaction réduite du champ magnétique du palpeur avec le métal de base et par conséquent à une densité de courant réduite. Cet effet peut être utilisé comme une mesure de l'épaisseur du revêtement.



Légende

- 1 palpeur
- 2 revêtement non conducteur
- 3 métal de base conducteur

Figure A.2 — Représentation schématique de la densité de courant dans le cas d'un revêtement non conducteur sur un métal de base conducteur

Pour établir que la densité de courant n'est pas une mesure unique de l'épaisseur du revêtement, il convient que cette densité ne soit pas affectée ou limitée par l'épaisseur du métal de base. Pour cela, il est nécessaire que l'épaisseur du métal de base soit supérieure à l'épaisseur minimale du métal de base.

Cette épaisseur minimale, t_{\min} , en millimètres, peut être évaluée comme indiqué dans la [Formule \(A.2\)](#) (voir [5.3](#)):

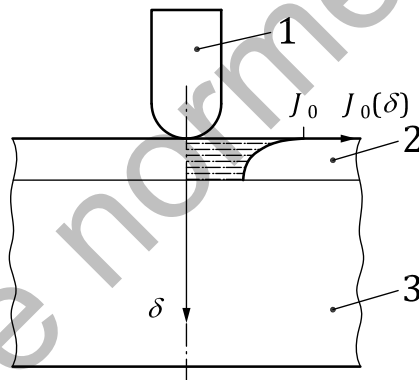
$$t_{\min} = 3\delta_0 \tag{A.2}$$

NOTE t_{\min} est très souvent appelée «épaisseur de saturation». Si l'épaisseur du métal de base est inférieure à cette épaisseur minimale, t_{\min} , la valeur mesurée de l'épaisseur du revêtement sera affectée et la valeur d'épaisseur obtenue sera excessive.

Cependant, dans le cas particulier des revêtements très minces avec une très faible conductivité, la méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude peut être également appliquée car ces revêtements sont considérés comme non conducteurs. Un exemple type est un revêtement de chrome mince plaqué sur du cuivre avec une épaisseur de revêtement inférieure à 10 μm . Dans cette situation, l'impact des courants de Foucault induits dans le revêtement peut être négligé. Toutefois, une épaisseur plus grande entraîne une densité de courant accrue dans le revêtement, ce qui a pour effet d'augmenter l'erreur d'épaisseur, bien que la conductivité du revêtement de chrome soit faible. Il convient de déterminer ou d'estimer l'erreur d'épaisseur éventuelle pour décider si la méthode est applicable ou non.

A.3 Exemple 2: Revêtement conducteur sur un matériau de base non conducteur

Dans ce cas, la densité de courant est uniquement dépendante de l'épaisseur du revêtement conducteur (voir [Figure A.3](#)). Une épaisseur de revêtement importante donne lieu à une interaction accrue du champ magnétique du palpeur avec le revêtement conducteur et par conséquent à une densité de courant accrue. Cet effet peut être utilisé comme une mesure de l'épaisseur du revêtement.



Légende

- 1 palpeur
- 2 revêtement conducteur
- 3 matériau de base non conducteur

Figure A.3 — Représentation schématique de la densité de courant dans le cas d'un revêtement conducteur sur un matériau de base non conducteur

L'épaisseur mesurable maximale approchée, t_{\max} , en millimètres, peut être calculée à l'aide de la [Formule \(A.3\)](#):

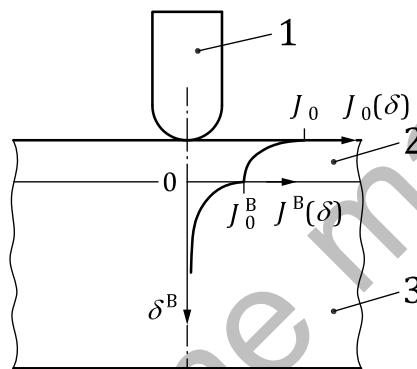
$$t_{\max} = 0,8 \delta_0 \tag{A.3}$$

Par exemple, la gamme d'épaisseurs est limitée par la profondeur de pénétration δ_0 . Si l'épaisseur du revêtement conducteur est encore augmentée, l'augmentation résultante de la densité de courant produite commence à devenir plus modérée, c'est-à-dire que la sensibilité du mesurage sera réduite.

La méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude est uniquement capable de mesurer un revêtement conducteur sur un matériau non conducteur. Dans le cas d'un revêtement conducteur sur un métal de base conducteur, la méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude n'est pas capable de faire la distinction entre le revêtement et le métal de base, c'est-à-dire que la totalité de la densité de courant produite dans le revêtement et le métal de base serait utilisée pour déterminer l'épaisseur du revêtement. Cela conduit à des valeurs d'épaisseur incorrectes.

A.4 Exemple 3: Revêtement conducteur sur un métal de base conducteur et/ou magnétique

Dans ce cas, comme illustré à la [Figure A.4](#), la densité de courant produite est déterminée par l'épaisseur et la conductivité du revêtement ainsi que par la conductivité et la perméabilité du métal de base. L'épaisseur du revêtement ne peut être mesurée qu'à l'aide de la méthode par courants de Foucault sensible aux variations de phase. Les informations détaillées sont données dans l'ISO 21968.



Légende

- 1 palpeur
- 2 revêtement conducteur
- 3 métal de base non conducteur

Figure A.4 — Représentation schématique de la densité de courant dans le cas d'un revêtement conducteur sur un métal de base conducteur et/ou magnétique

A.5 Exemple 4: Revêtement non conducteur sur un métal de base magnétique

Dans le cas considéré, la densité de courant est uniquement dépendante de la distance entre le palpeur et le métal de base, c'est-à-dire de l'épaisseur du revêtement (voir [Figure A.2](#)). Cependant, l'impédance du palpeur est également affectée par les propriétés magnétiques du métal de base, ce qui entraîne des erreurs de mesure d'épaisseur. Cet effet de mesure supplémentaire est contraire à l'effet des courants de Foucault. En outre, la méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude est très sensible aux variations ou aux fluctuations de la perméabilité du métal de base, ce qui veut dire que, même lorsque le métal de base magnétique a été pris en compte lors de l'étalonnage, on s'attend à ce que les résultats de mesure d'épaisseur présentent des variations importantes sur différents métaux de base magnétiques et également à différents emplacements sur un même métal de base (par exemple, l'acier). Par conséquent, il convient d'utiliser dans cette situation la méthode magnétique spécifiée dans l'ISO 2178.

Uniquement dans le cas de revêtements très épais (épaisseur supérieure à environ 1 mm), la méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude peut être également utilisée pour cette application. Il y a deux raisons à cela:

- a) pour ces revêtement épais, l'impact relatif de la perméabilité du métal de base est considérablement réduit;

- b) pour mesurer ces revêtements épais, il est nécessaire que la bobine du palpeur de courants de Foucault ait un grand diamètre, ce qui a pour effet d'augmenter l'aire active du revêtement inclus dans le mesurage. De cette manière, le palpeur intègre les variations de la perméabilité sur l'ensemble de l'aire active, donnant ainsi des résultats plus stables.

Il convient que l'épaisseur de revêtement minimale nécessaire pour utiliser cette méthode pour ces applications soit déterminée par rapport à la répétabilité et à la justesse acceptables prévues du mesurage.

Projet de norme marocaine

Annexe B (informative)

Principes de base de la détermination de l'incertitude de mesure de la méthode de mesure utilisée correspondant à le Guide ISO/ IEC 98-3

B.1 Généralités

Les épaisseurs de revêtement sont généralement déterminées comme la valeur moyenne de plusieurs mesurages individuels réalisés sur une section fixe de la surface de la couche.

Sur la base de ces mesurages, une valeur moyenne est attribuée au mesurande «épaisseur de revêtement». Une valeur d'incertitude associée fournit des informations sur la fiabilité de la valeur attribuée.

L'analyse est effectuée progressivement et commence par l'élaboration d'une équation de modèle montrant la corrélation fonctionnelle entre la valeur de sortie indiquée, t , et toutes les grandeurs d'influence pertinentes, H_i , comme indiqué dans la [Formule \(B.1\)](#):

$$t = F(H_0, H_1, H_2, \dots, H_i, \dots, H_n) \quad (\text{B.1})$$

À chaque grandeur d'influence est associé un coefficient de sensibilité, c_i , qui indique l'importance de l'effet d'une modification ΔH_i sur le résultat t .

Lorsque la fonction F est donnée sous forme d'une expression analytique, les coefficients de sensibilité peuvent être calculés par une dérivée partielle; voir la [Formule \(B.2\)](#):

$$c_i = \frac{\delta t}{\delta H_i} \quad (\text{B.2})$$

Lorsque le type de corrélation fonctionnelle est inconnu, une approximation au moyen de fonctions polynomiales est recommandée.

Dans de nombreux cas pratiques, cette formulation est exprimée par une dépendance linéaire, c'est-à-dire que les coefficients de sensibilité sont constants. Cette situation apparaît, par exemple, dans des sections ayant une épaisseur de revêtement limitée.

Afin d'additionner correctement les incertitudes associées à diverses influences sur l'erreur, toutes les composantes d'incertitude individuelles peuvent être rapportées à un niveau de confiance de 68,27 %, également appelé «incertitude-type».

Il existe deux types d'incertitude: type A (voir [B.2](#)) et type B (voir [B.3](#)).

B.2 Type A

L'incertitude-type de type A est une mesure de toutes les erreurs aléatoires résultant de variations temporelles et spatiales imprévisibles ou stochastiques de grandeurs d'influence.

L'incertitude-type correspond au niveau de confiance de la valeur moyenne; voir la Formule (B.3) et la Formule (B.4):

$$u_{\text{sto}} = t(68,27\%, n-1) \times \frac{s(t)}{\sqrt{n}} \quad (\text{B.3})$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{x} - x_j)^2}{(n-1)}} \quad (\text{B.4})$$

où

s est l'écart-type empirique des n mesurages répétés; et

$t(68,27\%, n-1)$ est le facteur de Student (degrés de liberté $f = n - 1$ et niveau de confiance avec $p = 68,27\%$).

Les valeurs correspondantes sont indiquées dans l'Annexe E.

B.3 Type B

De nombreux facteurs d'influence ou erreurs ne sont pas destinés à être décrits par le type A, par exemple les facteurs d'influence de l'Article 5. Ils sont classés en tant que type B.

Pour obtenir une combinaison équilibrée de ces influences sur l'erreur avec les incertitudes de type A, des facteurs de probabilité ad-hoc sont attribués. Dans de nombreux cas pratiques, les facteurs d'influence traités dans le présent document doivent être décrits par une distribution uniforme (distribution rectangulaire).

Lorsqu'une grandeur d'influence varie dans une section ΔH_i , l'incertitude qui en résulte peut être calculée comme indiqué dans la Formule (B.5):

$$u_B = \frac{|t_{\text{max}} - t_{\text{min}}|}{\sqrt{12}} \quad (\text{B.5})$$

Ces fluctuations sont généralement estimées ou déterminées expérimentalement (voir l'Annexe D)

Dans de nombreuses applications, des incertitudes connues peuvent être utilisées pour la détermination de l'incertitude. Un exemple type est une incertitude donnée d'un étalon de référence d'épaisseur. Pour cela, il faut tenir compte du fait que ces incertitudes déclarées doivent être converties en incertitude-type; par exemple, pour $U(k=2)$ s'ensuit l'incertitude-type indiquée dans la Formule (B.6):

$$u(68,27\%) = \frac{U(95,45\%)}{2} \quad (\text{B.6})$$

Pour additionner toutes les incertitudes étudiées, l'incertitude composée est calculée en multipliant toutes les incertitudes-types par leur coefficient de sensibilité et en les additionnant au carré. Dans un cas simplifié, les coefficients de sensibilité sont tous égaux à un; voir la Formule (B.7):

$$u = \sqrt{\sum_i (c_i u_i)^2} \quad (\text{B.7})$$

La multiplication par un facteur d'élargissement indiqué $k \geq 2$ donne une incertitude élargie qu'il convient d'indiquer dans le résultat réel; voir la Formule (B.8):

$$U = k \cdot u \quad (\text{B.8})$$

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 d'amplitude décrite dans le présent document

C.1 Spécifications techniques

Il convient que les spécifications techniques du fabricant fournissent au moins les informations techniques suivantes sur les instruments et les palpeurs:

- a) principe de mesure;
- b) étendue de mesure;
- c) informations de base sur l'incertitude de mesure ou l'erreur de mesure tolérée lorsque le mesurage est effectué dans les conditions spécifiées par le fabricant;
- d) informations concernant l'influence du matériau, de la courbure et de l'épaisseur du métal de base et de l'effet de bord (mesurages effectués à proximité d'un bord) sur les résultats de mesure;
- e) durée de fonctionnement de la batterie;
- f) fonction d'un dispositif de surveillance de sous-tension et arrêt automatique en cas de sous-tension;
- g) température de fonctionnement admissible;
- h) température de stockage admissible;
- i) méthodes disponibles pour l'étalonnage et l'ajustage;
- j) force de contact des palpeurs munis de manchons à ressort;
- k) disponibilité d'une compensation de température;
- l) fréquence de mesurage;
- m) mémoire de données (conception, capacité, communication de données);
- n) dimensions et masse de l'instrument (avec les batteries) et des palpeurs.

C.2 Contrôle/vérification des instruments et des palpeurs

C.2.1 Avant livraison, après réparation et à intervalles réguliers après utilisation

Après avoir ajusté les instruments et les palpeurs conformément aux instructions du fabricant, il convient de contrôler et vérifier l'exactitude de mesure en utilisant un métal de base plan et non revêtu et un nombre représentatif d'étalons revêtus ou de feuilles d'étalonnage dont les épaisseurs de revêtement ou de feuille sont également réparties sur l'étendue de mesure du palpeur considéré.

Le but du contrôle/de la vérification des instruments est de s'assurer que les écarts d'épaisseur se situent dans les limites indiquées dans la spécification technique du fabricant.

C.3 Effectués sur site

Il convient de vérifier quotidiennement l'exactitude des instruments et des palpeurs. Après avoir ajusté l'instrument conformément aux instructions du fabricant, effectuer une vérification avec un nombre approprié d'étalons revêtus fabriqués à partir du même métal de base que les éléments à mesurer ou au moyen de feuilles-étalons placées sur le métal de base à mesurer. Il convient que leurs épaisseurs couvrent la gamme d'épaisseur de revêtement attendue. Lorsque des éléments revêtus courbes doivent être mesurés, la vérification doit être effectuée sur des éléments fabriqués à partir du même métal de base et présentant la même géométrie et la même courbure que les éléments à mesurer.

Le but du contrôle/de la vérification des instruments est de s'assurer que les écarts d'épaisseur se situent dans les limites indiquées dans la spécification technique du fabricant.

Annexe D (informative)

Exemples d'estimation expérimentale des facteurs influant sur l'exactitude de mesure

D.1 Généralités

Les facteurs influant sur l'exactitude de mesure sont énumérés et décrits à l'Article 5. Lors des mesurages réalisés dans la pratique, il est important d'estimer l'influence de ces facteurs ou l'incertitude qui en résulte. Par conséquent, des exemples d'expériences simples sont décrits dans la présente annexe pour montrer la manière dont l'influence de ces facteurs peut être estimée. Ces expériences servent également de base à l'estimation de l'incertitude correspondante.

Les facteurs décrits en D.2 à D.5 peuvent avoir des influences variables pour un instrument utilisé avec un seul palpeur combinant plusieurs principes de mesure. Par conséquent, il convient d'estimer les facteurs séparément pour chaque principe de mesure.

D.2 Effet de bord

Un essai simple permettant de vérifier l'effet de la proximité d'un bord consiste à utiliser un échantillon plan, non revêtu et propre du métal de base et à suivre le mode opératoire décrit dans les étapes 1 à 4 ci-dessous. Le mode opératoire est illustré à la Figure D.1.

Étape 1

Placer le palpeur sur l'échantillon, suffisamment loin du bord.

Étape 2

Régler l'instrument sur zéro.

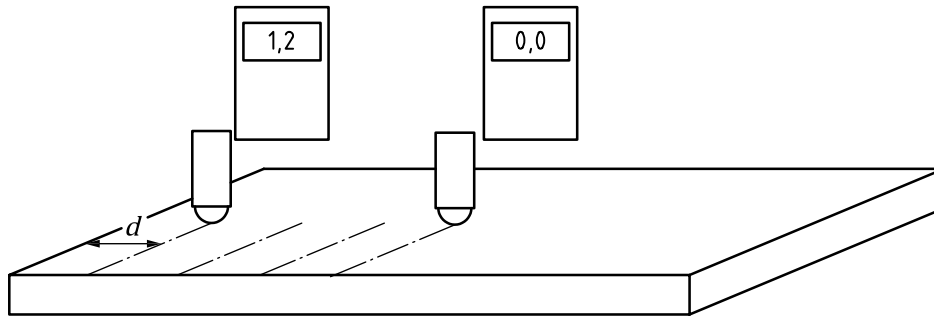
Étape 3

Amener progressivement le palpeur près du bord et noter l'emplacement où se produit une modification de la lecture de l'instrument par rapport à l'incertitude attendue ou à la tolérance d'épaisseur donnée.

Étape 4

Mesurer la distance, d , entre le palpeur et le bord (voir Figure D.1).

L'instrument peut être utilisé sans apporter de correction tant que le palpeur se trouve à une distance du bord supérieure à la distance mesurée ci-dessus. Si l'on utilise le palpeur plus près du bord, un ajustage spécial est nécessaire, ou bien l'incertitude supplémentaire obtenue pour la distance utilisée doit être prise en compte. Si nécessaire, se reporter aux instructions du fabricant.



Légende

d distance entre le palpeur et le bord

Figure D.1 — Représentation schématique de l'essai relatif à l'effet de bord

D.3 Épaisseur du métal de base

Un essai simple permettant de démontrer que l'épaisseur du métal de base, t_0 , est supérieure à l'épaisseur minimale critique du métal de base, t_0^{crit} , consiste à utiliser deux (ou plus) échantillons plans, propres et non revêtus du métal de base ayant l'épaisseur considérée et à suivre le mode opératoire décrit dans les étapes 1 à 4 ci-dessous. Le mode opératoire est illustré à la [Figure D.2](#).

Étape 1

Placer le palpeur sur le premier échantillon. Il convient de démontrer que la lecture n'est pas affectée par les bords de l'échantillon (voir [D.2](#)).

Étape 2

Régler l'instrument à zéro.

Étape 3

Placer le deuxième échantillon sous le premier, placer le palpeur au sommet de cette pile et vérifier la lecture de l'instrument. Si la lecture de l'instrument est encore zéro par rapport à l'incertitude attendue, l'épaisseur du métal de base, t_0 , est supérieure à l'épaisseur minimale critique du métal de base, t_0^{crit} , et aucune incertitude supplémentaire ne doit être prise en compte. Si la lecture de l'instrument présente une variation négative par rapport à l'incertitude attendue, t_0 est inférieure à t_0^{crit} , c'est-à-dire que le mesurage est influencé par l'épaisseur trop faible du métal de base.

Étape 4

Si t_0 est inférieure à t_0^{crit} , placer un troisième échantillon sous la pile de l'étape 3, placer le palpeur au sommet de cette pile et vérifier la lecture de l'instrument. Si la lecture de l'instrument est toujours identique à celle de l'étape 3 par rapport à l'incertitude, l'épaisseur minimale critique du métal de base se situe dans l'intervalle $t_0 < t_0^{\text{crit}} < 2t_0$. Si la lecture de l'instrument indique une valeur plus négative que dans l'étape 3, alors deux fois la valeur de t_0 est encore inférieure à t_0^{crit} . Continuer d'empiler d'autres échantillons afin d'estimer t_0^{crit} .

L'instrument peut être utilisé sans correction à condition que l'épaisseur du métal de base t_0 soit supérieure à t_0^{crit} . Si t_0 est inférieure à t_0^{crit} , une correction spéciale doit être apportée à l'étalonnage et il faut considérer que des variations éventuelles du métal de base provoquent une augmentation de l'incertitude associée à l'épaisseur correspondante.

L'épaisseur minimale critique du métal de base déterminée expérimentalement t_0^{crit} peut être utilisée pour estimer l'incertitude résultante.

Pour améliorer l'exactitude de l'estimation de t_0^{crit} , il convient d'utiliser des échantillons ayant une épaisseur inférieure à t_0 .

Si l'instrument n'affiche pas de valeurs négatives, il est recommandé d'utiliser une feuille mince (par exemple 10 μm) entre le palpeur et le métal de base pour observer la diminution de l'épaisseur.

NOTE La méthode consistant à empiler plusieurs échantillons pour simuler une augmentation de l'épaisseur du métal de base permet une bonne estimation de t_0^{crit} car l'impact de l'entrefer entre les échantillons sur la production de courants de Foucault dans la pile d'échantillons par rapport au matériau homogène correspondant est presque négligeable (la direction des courants de Foucault est perpendiculaire à l'axe du palpeur). Par conséquent, cette méthode simplifiée peut être plus facile à réaliser avec de bons résultats que de produire des métaux de base d'épaisseur variable.

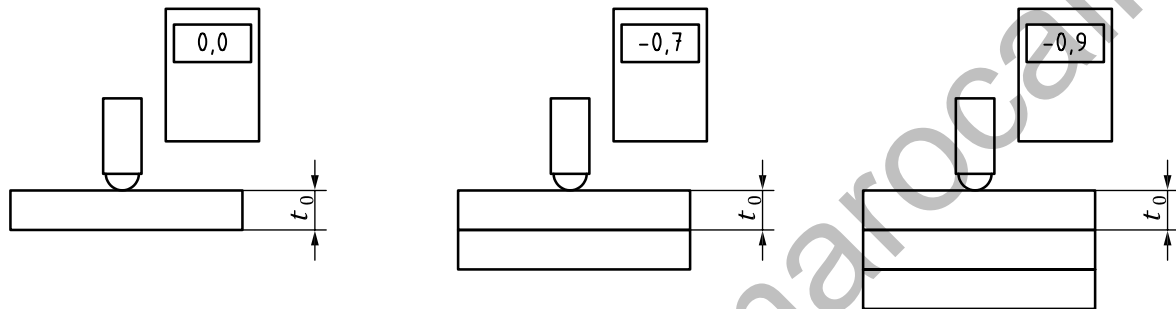


Figure D.2 — Représentation schématique de l'essai relatif à l'épaisseur du métal de base

D.4 Courbure de la surface

Un essai simple permettant d'évaluer l'effet de l'influence de la courbure de la surface de l'échantillon utilise un échantillon propre et non revêtu du métal de base avec différents diamètres de courbure (par exemple un cylindre) et suit le mode opératoire décrit dans les étapes 1 à 4 ci-dessous. Il convient que tous les échantillons utilisés présentent les mêmes propriétés de matériau que le métal de base. Le mode opératoire illustré à la [Figure D.3](#) utilise l'exemple d'une courbure convexe.

Étape 1

Placer le palpeur sur un échantillon plan (sans courbure). Il convient de démontrer que la lecture n'est pas affectée par les bords de l'échantillon (voir [D.2](#)) et que l'épaisseur du métal de base de l'échantillon est supérieure à l'épaisseur minimale critique du métal de base (voir [D.3](#)).

Étape 2

Régler l'instrument à zéro.

Étape 3

Placer le palpeur sur chaque échantillon en commençant par le plus grand diamètre disponible et en poursuivant l'essai avec les diamètres d'échantillon décroissants. Noter le diamètre pour lequel une modification de la lecture de l'instrument (augmentation positive) est observée par rapport à l'incertitude attendue ou à la tolérance d'épaisseur donnée.

L'instrument peut être utilisé sans correction à condition que l'échantillon considéré présente un plus grand diamètre que celui relevé ci-dessus. Si le diamètre est plus petit, un ajustage spécial ou une correction spéciale de l'étalonnage est nécessaire ou l'incertitude supplémentaire obtenue pour la distance utilisée peut être prise en compte. Si nécessaire, se reporter aux instructions du fabricant.

Dans la pratique, le diamètre des échantillons considérés varie très souvent. Dans cette situation, il convient d'estimer le plus petit et le plus grand diamètre et d'ajuster l'instrument sur un échantillon non revêtu proche du diamètre moyen. Ainsi, l'écart mesuré pour le plus petit et le plus grand diamètre

peut être estimé par le mode opératoire décrit et utilisé pour estimer l'incertitude. Cette incertitude doit être prise en compte pendant le mesurage.

Pour améliorer l'exactitude de l'estimation de l'influence de la courbure, augmenter le nombre d'échantillons ayant des diamètres différents.

NOTE Le même mode opératoire peut être utilisé dans les cas où les échantillons présentent une courbure concave; toutefois, cette courbure concave donne des lectures d'épaisseur négatives. Si l'instrument n'affiche pas de valeurs négatives, il est recommandé d'utiliser une feuille mince (par exemple 10 µm) entre le palpeur et le métal de base pour observer la diminution de l'épaisseur.

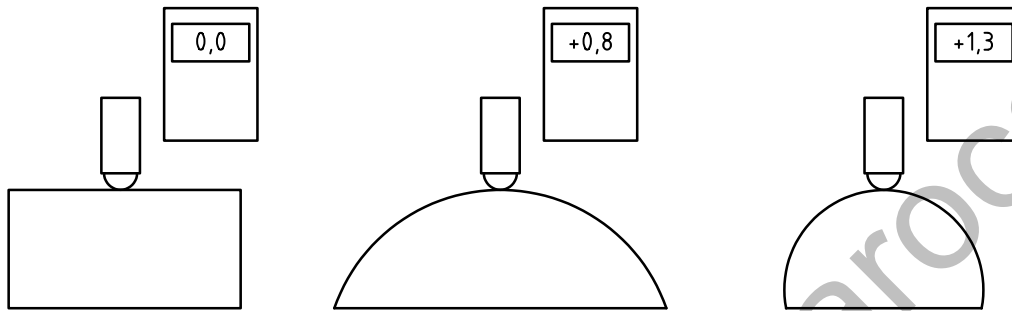


Figure D.3 — Représentation schématique de l'essai relatif à l'effet de courbure

D.5 Conductivité du métal de base

Dans la pratique, la conductivité du métal de base varie très souvent. Un mode opératoire simplifié décrit dans les étapes 1 à 5 ci-dessous aide à réduire cette influence et à estimer l'incertitude résultante. Ce mode opératoire nécessite plusieurs échantillons plans, propres et non revêtus représentant approximativement la variation attendue du métal de base. Le mode opératoire est illustré à la [Figure D.4](#).

Étape 1

Placer le palpeur sur l'un des échantillons. Il convient de démontrer que la lecture n'est pas affectée par les bords de l'échantillon (voir [D.2](#)), que l'épaisseur du métal de base de l'échantillon est supérieure à l'épaisseur minimale critique du métal de base (voir [D.3](#)) et que l'échantillon est plan (pas de courbure, voir [D.4](#)).

Étape 2

Régler l'instrument à zéro.

Étape 3

Placer le palpeur sur chacun des échantillons et relever la valeur indiquée. Il est recommandé d'effectuer des mesurages répétés sur chaque échantillon et d'utiliser la valeur moyenne lors des étapes suivantes.

Étape 4

Calculer la moyenne des lectures de tous les échantillons et choisir l'échantillon présentant l'écart le plus faible par rapport à cette moyenne.

Étape 5

Utiliser cet échantillon sélectionné comme métal de base de référence pour effectuer le réglage du zéro pour tous les mesurages.

L'instrument peut être utilisé sans correction à condition que l'écart de l'échantillon donnant la plus petite lecture (ou la plus grande lecture) par rapport à la valeur moyenne calculée soit inférieur à l'incertitude attendue ou à la tolérance d'épaisseur donnée.

En cas de variations importantes, il convient d'utiliser l'échantillon sélectionné comme métal de base de référence et l'écart estimé des lectures obtenues par le mode opératoire décrit peut être utilisé pour estimer l'incertitude. Cette incertitude doit être prise en compte pendant les mesurages.

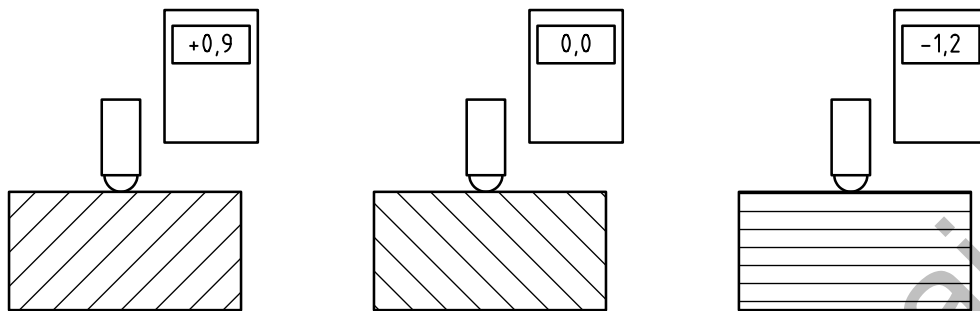


Figure D.4 — Représentation schématique de l'essai relatif à la conductivité du métal de base

Annexe E (informative)

Tableau du facteur de student

Tableau E.1 — Facteur de student

Nombre de mesurages n	Fraction p en pourcentage	
	68,27 %	95,45 %
2	1,84	13,97
3	1,32	4,53
4	1,20	3,31
5	1,14	2,87
6	1,11	2,65
7	1,09	2,52
8	1,08	2,43
9	1,07	2,37
10	1,06	2,32
11	1,05	2,28
12	1,05	2,25
13	1,04	2,23
14	1,04	2,21
15	1,04	2,20
16	1,03	2,18
17	1,03	2,17
18	1,03	2,16
19	1,03	2,15
20	1,03	2,14
∞	1,00	2,00

Annexe F (informative)

Exemple d'estimation de l'incertitude (voir [Article 8](#))

F.1 Détails relatifs à l'échantillon

L'exemple d'échantillon à mesurer est comme suit:

- peinture/aluminium (pièce d'une carrosserie de voiture);
- épaisseur attendue: environ 25 μm ;
- le métal de base n'est pas accessible, mais des variations possibles de l'épaisseur dues aux lots d'aluminium utilisés (variations de conductivité) ont été déterminées par une expérience (voir [D.5](#)): mesurage de pièces en aluminium non revêtu issues de la production de la carrosserie représentant la variabilité de l'aluminium utilisé provenant de différents fournisseurs, lots de production, etc., donnant une gamme de variation de l'épaisseur totale à $t = 25 \mu\text{m}$: $\Delta t_{\text{bm}} = \pm 1,2 \mu\text{m}$.

F.2 Étapes

F.2.1 L'exemple d'échantillon est mesuré en suivant ces étapes.

a) Vérifier l'étalonnage du palpeur:

- 1) 10 mesurages répétés avec une feuille de référence de $t_r = 25,2 \mu\text{m}$ appliquée sur le métal de base (incluant la mise à zéro sur le métal de base);
- 2) tolérance donnée pour la feuille de référence: $T = \pm 0,5 \mu\text{m}$;
- 3) le métal de base utilisé est un métal de base de référence choisi (voir [D.5](#));
- 4) le résultat est ($n = 10$): $\bar{t} = 24,06 \mu\text{m}$ et $s(t) = 0,11 \mu\text{m}$;
- 5) calculer l'incertitude et E (voir [8.2](#)):

i) l'incertitude-type de la feuille de référence est:

$$u_r = \frac{T}{\sqrt{3}} = \frac{0,5 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,29 \mu\text{m}$$

ii) l'incertitude-type du mesurage de vérification (seule la composante stochastique est prise en compte) est:

$$u_{\text{sto}} = t(68,27\%, n-1) \times \frac{s(t)}{\sqrt{n}} = 1,06 \times \frac{0,11 \mu\text{m}}{\sqrt{10}} = 0,04 \mu\text{m}$$

iii) l'incertitude composée est $u_c = \sqrt{(0,04 \mu\text{m})^2 + (0,29 \mu\text{m})^2} = 0,29 \mu\text{m}$

iv) l'incertitude élargie est $U_{\text{cal}}(k=2) = 2 \times u_c = 0,58 \mu\text{m}$

v) le résultat est $E = \frac{|\bar{t} - t_r|}{U_{\text{cal}}(k=2)} = \frac{1,14 \mu\text{m}}{0,58 \mu\text{m}} = 1,96$

vi) l'étalonnage n'est pas correct. Un écart significatif a été détecté, parce que $E = 1,96 > 1$, c'est-à-dire que la différence entre la valeur mesurée, \bar{t} , et la valeur donnée de la feuille de référence $|\bar{t} - t_r|$ est supérieure à $U_{\text{cal}}(k=2) = 0,58 \mu\text{m}$; par conséquent, l'exactitude de l'étalonnage peut être améliorée au moyen de cette feuille de référence.

b) Ajuster l'instrument avec la feuille de référence.

c) Vérifier l'étalonnage amélioré du palpeur.

1) 10 mesurages répétés (répétition de l'étape a)

2) Résultat ($n=10$): $\bar{t} = 24,87 \mu\text{m}$ et $s(t) = 0,11 \mu\text{m}$

3) L'étalonnage est correct parce que $E = 0,56 < 1$, c'est-à-dire que la différence $|\bar{t} - t_r|$ est inférieure à $U_{\text{cal}}(k=2) = 0,58 \mu\text{m}$; aucun écart significatif ne peut alors être démontré.

d) Calculer l'incertitude associée à l'étalonnage du palpeur (résultat de l'étape c):

1) $u_c = \sqrt{(0,03 \mu\text{m})^2 + (0,29 \mu\text{m})^2} = 0,29 \mu\text{m}$; $u_{\text{cal}} = 0,29 \mu\text{m}$

e) Mesurer l'échantillon.

1) Sept mesurages répétés dans l'aire de mesure donnée de l'échantillon.

2) Résultat ($n=7$): $\bar{t} = 22,8 \mu\text{m}$ et $s(t) = 0,76 \mu\text{m}$

f) Calculer toutes les composantes de l'incertitude de mesure et l'incertitude composée.

1) Incertitude stochastique (voir 8.3): $u_{\text{sto}} = t(68,27\%, n-1) \times \frac{s(t)}{\sqrt{n}} = 1,09 \times \frac{0,76 \mu\text{m}}{\sqrt{7}} = 0,31 \mu\text{m}$

2) Incertitude-type due à un écart possible du métal de base par rapport à l'étalonnage (gamme de variation d'épaisseur attendue) (voir 8.4): $\Delta t_{\text{bm}}(25 \mu\text{m}) = \pm 1,2 \mu\text{m}$; $u_{\text{bm}} = 0,69 \mu\text{m}$

3) Incertitude composée (voir 8.5):

$u_c = \sqrt{u_{\text{cal}}^2 + u_{\text{sto}}^2 + u_{\text{bm}}^2} = \sqrt{(0,29 \mu\text{m})^2 + (0,31 \mu\text{m})^2 + (0,69 \mu\text{m})^2} = 0,81 \mu\text{m}$

g) Calculer l'incertitude élargie et expression du résultat

1) Incertitude élargie (voir 8.5): $U(k=2) = 2 \times u_c = 1,6 \mu\text{m}$

2) Résultat final du mesurage: $t = 23 \mu\text{m} \pm 1,6 \mu\text{m}$

F.2.2 Tous les autres facteurs pouvant influencer sur l'exactitude du mesurage sont considérés comme négligeables dans cet exemple (effet de bord, épaisseur du métal de base, courbure, dérive de température, etc.).

F.2.3 Autres conclusions: il est évident que l'incertitude obtenue est limitée par la composante d'incertitude la plus importante, dans ce cas la variation possible des propriétés du métal de base (variation de la conductivité). Par conséquent, une augmentation du nombre de mesurages répétés permettrait de réduire u_{sto} ; toutefois, l'incertitude composée ne serait pas fortement affectée par cette procédure.

Annexe G (informative)

Détails relatifs à la fidélité

G.1 Notes générales concernant l'essai interlaboratoires

Un essai interlaboratoires a été réalisé pour déterminer les données de fidélité en utilisant les jauges de la méthode par courants de Foucault sensible aux variations d'amplitude pour mesurer l'épaisseur de revêtements.

Douze laboratoires ont pris part à l'essai interlaboratoires.

G.2 Échantillons

Pour l'essai interlaboratoires, six revêtements différents sur différents substrats en aluminium ont été préparés (voir [Tableau G.1](#)).

Pour définir le mesurage, cinq points de mesure ont été assignés sur chaque échantillon.

Tableau G.1 — Échantillons

Numéro de l'échantillon	Substrat	Revêtement	Épaisseur du revêtement µm approx.	Feuille-étalon µm
P02	Aluminium	Revêtement de finition rouge utilisé pour la réparation d'une voiture	80	125
P07	Aluminium	Revêtement vert appliqué par électrodéposition (ED)	20	25
P08	Aluminium	Revêtement ED + couche de fond + revêtement transparent	120	125
P11	Aluminium	Revêtement anodisé	9	12
P12	Aluminium	Revêtement anodisé bleu	17	25
P13	Aluminium	Dépôt de chrome	17	25

G.3 Jauges d'épaisseur de feuil

Pour l'essai interlaboratoires, des jauges d'épaisseur provenant de fabricants différents et munies de différents types de palpeurs ont été utilisées.

G.4 Étalonnage

Un étalonnage en deux points ou un ajustage des jauges a été effectué (point zéro et épaisseur de la feuille-étalon).

Deux méthodes d'étalonnage différentes avec des feuilles de plastique certifiées ont été appliquées. Les mesurages ont été basés sur ces étalonnages:

- Méthode de référence – R: étalonnage et ajustage avec la feuille appliquée sur des échantillons d'origine non revêtus ou au dos de l'échantillon. Cette méthode est préférentielle (voir [5.2](#)) et des incertitudes supplémentaires sont évitées;
- Méthode normalisée – S: étalonnage et ajustage avec la feuille appliquée sur un panneau en aluminium normalisé non revêtu. Dans cette méthode, des incertitudes supplémentaires dues aux écarts du métal de base de l'échantillon par rapport au panneau normalisé non revêtu doivent être attendues.

Les épaisseurs des feuilles-étalons étaient les suivantes: 12 μm , 25 μm et 125 μm .

Les mesurages de l'épaisseur des revêtements ont été réalisés juste après chaque étalonnage et ajustage.

G.5 Nombre de mesurages

Pour le calcul de la limite de répétabilité, les mesurages sur le premier point de mesure marqué ont été effectués en triple.

Ensuite, les quatre autres points marqués ont été mesurés.

G.6 Évaluation

G.6.1 Généralités

L'évaluation statistique a été effectuée conformément à l'ISO 5725-2 et à l'ISO/TR 22971.

L'évaluation a été effectuée pour chaque méthode d'étalonnage.

G.6.2 Évaluation du premier point de mesure

La limite de répétabilité, r_{x_1} , et la limite de reproductibilité, R_{x_1} , ont été calculées à partir du premier point de mesure mesuré trois fois.

G.6.3 Évaluation de l'ensemble des cinq points de mesure

La limite de répétabilité, $r_{\bar{x}}$, et la limite de reproductibilité, $R_{\bar{x}}$, ont été calculées à partir des cinq points de mesure. Pour le premier point de mesure, la moyenne arithmétique des trois mesurages est utilisée.

Le [Tableau G.2](#) contient les résultats pour les limites de répétabilité et les limites de reproductibilité calculées à partir du premier point de mesure comparés aux limites correspondantes calculées à partir des cinq points de mesure.

Tableau G.2 — Limite de répétabilité, r , et limite de reproductibilité, R

Méthodes d'étalonnage	r_{x_1} μm	R_{x_1} μm	$r_{\bar{x}}$ μm	$R_{\bar{x}}$ μm
12-R	1,0	_ ^a	1,5	_ ^a
12-S	1,0	_ ^a	1,5	_ ^a
25-R	1,6	4,1	2,2	3,7
25-S	1,7	5,0	2,3	5,3
125-R	2,7	5,6	12,3	12,3
125-S	2,3	6,0	12,5	13,0

r_{x_1} et R_{x_1} Limite de répétabilité et limite de reproductibilité du premier point de mesure (mesurage en triple).
 $r_{\bar{x}}$ et $R_{\bar{x}}$ Limite de répétabilité et limite de reproductibilité des cinq points de mesure
^a Aucun calcul de la reproductibilité R_{x_1} et $R_{\bar{x}}$ n'a pu être effectué pour un seul échantillon

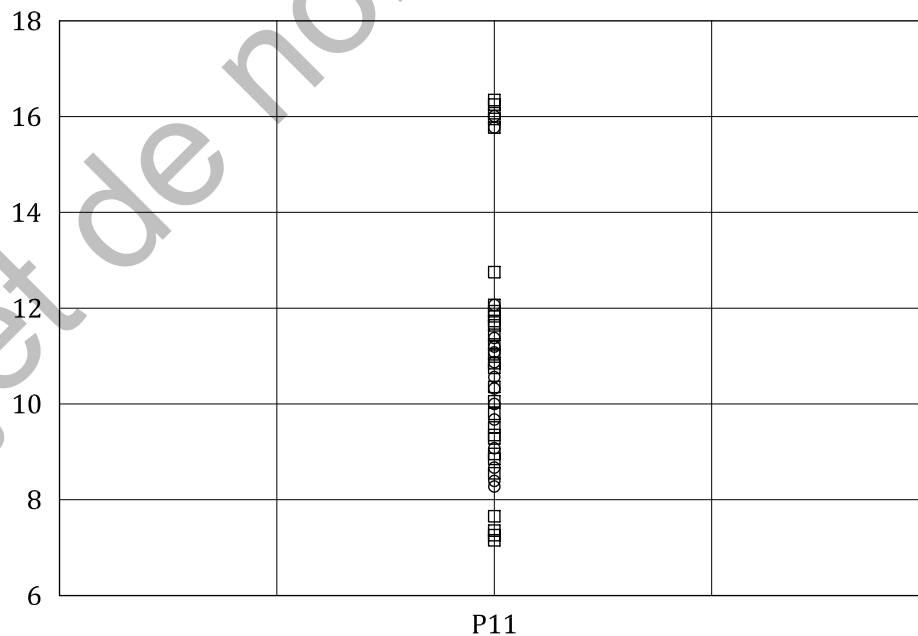
NOTE Le résultat plus élevé de la limite de répétabilité, r_{x_1} , pour 125-R par rapport à 125-S pourrait avoir plusieurs raisons.

La [Figure G.1](#) à la [Figure G.3](#) illustrent les résultats de mesurages de l'épaisseur basés sur trois feuilles-étalons d'épaisseurs différentes,

où

R est la méthode de référence, et

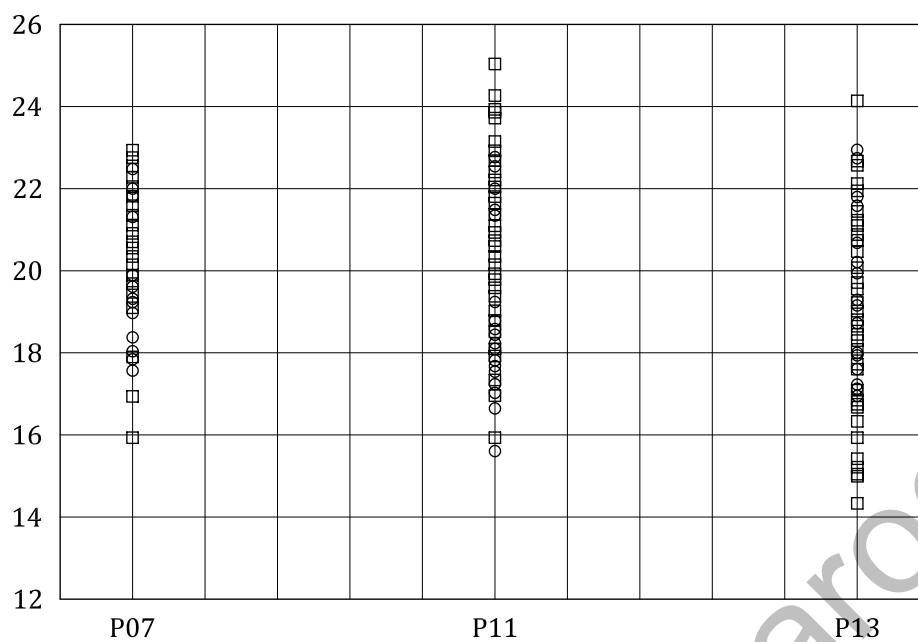
S est la méthode normalisée (voir également [G.4](#)).



Légende

- SD-12-R
- SD-12-S

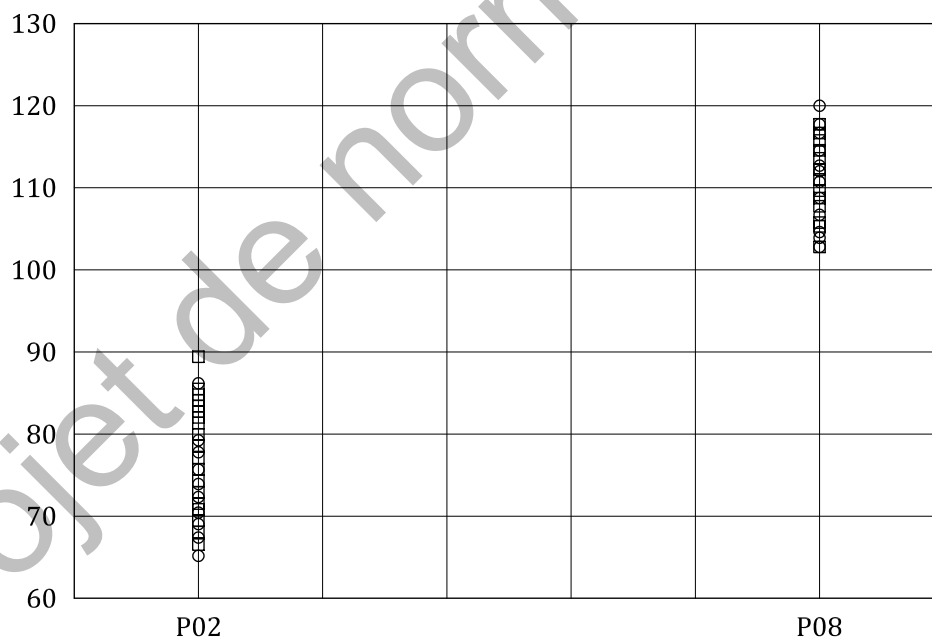
Figure G.1 — Comparaison de l'étalonnage par la méthode de référence et par la méthode normalisée avec une feuille de 12 μm



Légende

- SD-25-R
- SD-25-S

Figure G.2 — Comparaison de l'étalonnage par la méthode de référence et par la méthode normalisée avec une feuille de 25 µm



Légende

- SD-125-R
- SD-125-S

Figure G.3 — Comparaison de l'étalonnage par la méthode de référence et par la méthode normalisée avec une feuille de 125 µm

Bibliographie

- [1] ISO 2178, *Revêtement métalliques non magnétiques sur métal de base magnétique — Mesurage de l'épaisseur du revêtement — Méthode magnétique*
- [2] ISO 2361, *Revêtements électrolytiques de nickel sur métal de base magnétique et non magnétique — Mesurage de l'épaisseur — Méthode magnétique*
- [3] ISO 2808, *Peintures et vernis — Détermination de l'épaisseur du feuil*
- [4] ISO 5725-1:1994, *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure — Partie 1: Principes généraux et définitions*
- [5] ISO 5725-2, *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure — Partie 2: Méthode de base pour la détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée*
- [6] ISO 21968, *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*
- [7] Guide ISO/IEC 99:2007, *Vocabulaire international de métrologie — Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*
- [8] ISO/TR 22971, *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure — Lignes directrices pratiques pour l'utilisation de l'ISO 5725-2:1994 pour la conception, la mise en oeuvre et l'analyse statistique des résultats de répétabilité et de reproductibilité interlaboratoires*