
**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**

*Non-conductive coatings on non-magnetic electrically conductive
base metals — Measurement of coating thickness — Amplitude-
sensitive eddy-current method*

get full document from standards.iteh.ai



Sample Document

get full document from standards.iteh.ai



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2017, Publié en Suisse

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, 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, l'affichage sur l'internet ou sur un Intranet, sans autorisation écrite préalable. Les demandes d'autorisation peuvent être adressées à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Ch. de Blandonnet 8 • CP 401
CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland
Tel. +41 22 749 01 11
Fax +41 22 749 09 47
copyright@iso.org
www.iso.org

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

Sample Document

get full document from standards.iteh.ai

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.

Sample Document

get full document from standards.iteh.ai

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

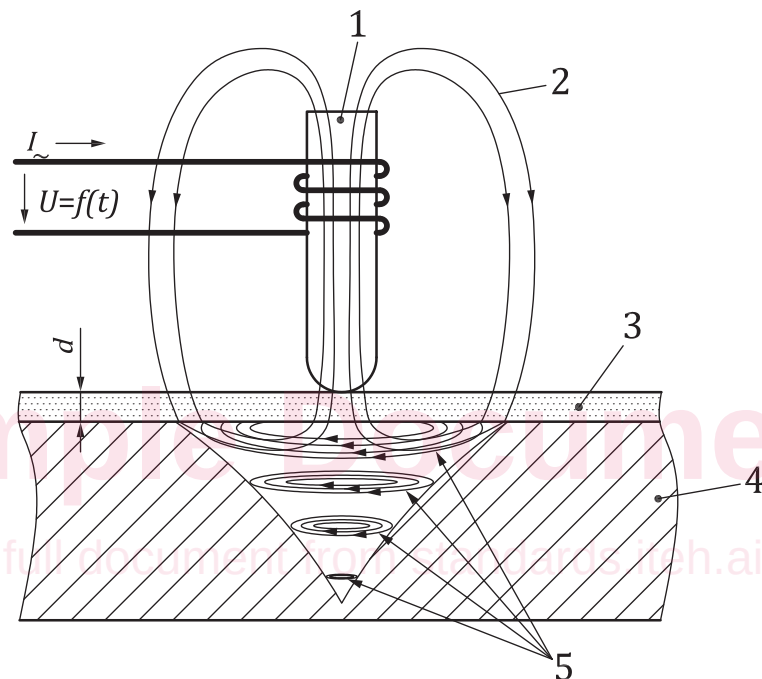
Les instruments à courants de Foucault fonctionnent sur le principe qu'un champ électromagnétique à haute fréquence, engendré par le système de palpeur de l'instrument, produit des courants de Foucault dans le métal de base au-dessous du revêtement sur lequel est placé le palpeur (voir [Figure 1](#)). 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.