
**Matériaux métalliques — Essai de
pénétration instrumenté pour la
détermination de la dureté et de
paramètres des matériaux —**

Partie 1:
Méthode d'essai

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

*Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and
materials parameters —*

Part 1: Test method

ISO 14577-1:2015

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/7f645fce-11d9-4901-a5a5-ab448f5ccb0/iso-14577-1-2015>



iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 14577-1:2015

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/7f645fce-11d9-4901-a5a5-ab448f5ccb0/iso-14577-1-2015>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2015, 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.....	iv
Introduction.....	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Symboles et désignations	2
4 Principe	3
5 Machine d'essai	4
6 Éprouvette	5
7 Mode opératoire	6
8 Incertitude des résultats	9
9 Rapport d'essai	10
Annexe A (normative) Paramètres de matériaux déterminés à partir de l'ensemble de données force/profondeur de pénétration	12
Annexe B (informative) Types de mode de contrôle pour le procédé de pénétration	25
Annexe C (normative) Compliance de la machine et fonction d'aire du pénétrateur	26
Annexe D (informative) Notes sur les pénétrations en diamant	28
Annexe E (normative) Influence de la rugosité de surface de l'éprouvette sur l'exactitude des résultats	29
Annexe F (informative) Corrélation de la dureté de pénétration, H_{IT}, avec la dureté Vickers	30
Annexe G (normative) Détermination de la vitesse de fluage et de dérive	32
Annexe H (informative) Estimation de l'incertitude des valeurs calculées de la dureté et de paramètres de matériaux	34
Annexe I (normative) Calcul de la correction radiale du déplacement	43
Bibliographie	45

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 (CEI) 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/CEI, 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/CEI, 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 sur la liste ISO des déclarations de brevets reçues (voir www.iso.org/brevets).

Les éventuelles appellations commerciales utilisées dans le présent document sont données pour information à l'intention des utilisateurs et ne constituent pas une approbation ou une recommandation.

Pour une explication de la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, aussi bien que pour des informations au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'OMC concernant les obstacles techniques au commerce (OTC) voir le lien suivant: [Avant-propos — Informations supplémentaires](http://www.iso.org/standards)

L'ISO 14577-1 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 164, *Essais mécaniques des matériaux métalliques*, sous-comité SC 3, *Essais de dureté*.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition (ISO 14577-1:2002), qui a fait l'objet d'une révision technique.

L'ISO 14577 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Matériaux métalliques — Essai de pénétration instrumenté pour la détermination de la dureté et de paramètres des matériaux*:

- *Partie 1: Méthode d'essai*
- *Partie 2: Vérification et étalonnage des machines d'essai*
- *Partie 3: Etalonnage des blocs de référence*
- *Partie 4: Méthode d'essai pour les revêtements métalliques et non métalliques*

Introduction

La dureté a été typiquement définie comme la résistance d'un matériau à la pénétration rémanente par un autre matériau plus dur. Les résultats obtenus lors d'essais Rockwell, Vickers et Brinell sont déterminés après enlèvement de la force d'essai. En conséquence, l'effet de la déformation élastique sous le pénétrateur a été ignoré.

L'ISO 14577 (toutes parties) a été préparée pour permettre à l'utilisateur d'évaluer la pénétration des matériaux en prenant en compte la force et le déplacement pendant les déformations plastique et élastique. En suivant le cycle complet d'accroissement et de suppression de la force d'essai, on peut déterminer des valeurs de dureté équivalentes aux valeurs traditionnelles de dureté. Plus important encore, on peut aussi déterminer des caractéristiques complémentaires du matériau telles que son module de pénétration et sa dureté élasto-plastique. Toutes ces valeurs peuvent être calculées sans qu'il y ait à mesurer l'empreinte par des moyens optiques. De plus, l'essai de pénétration instrumenté permet d'enregistrer des profils de dureté et de module en fonction de la profondeur, par une variété de techniques, lors d'un cycle de pénétration probablement complexe.

L'ISO 14577 (toutes parties) a été rédigée pour permettre une grande diversité d'analyses des données après essai.

iTeh STANDARD PREVIEW (standards.iteh.ai)

[ISO 14577-1:2015](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/7f645fce-11d9-4901-a5a5-ab448f5ccb0/iso-14577-1-2015)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/7f645fce-11d9-4901-a5a5-ab448f5ccb0/iso-14577-1-2015>

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 14577-1:2015

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/7f645fce-11d9-4901-a5a5-ab448f5ccb0/iso-14577-1-2015>

Matériaux métalliques — Essai de pénétration instrumenté pour la détermination de la dureté et de paramètres des matériaux —

Partie 1: Méthode d'essai

1 Domaine d'application

La présente partie de l'ISO 14577 spécifie la méthode d'essai de pénétration instrumenté pour la détermination de la dureté et d'autres paramètres de matériaux pour les trois plages suivantes :

- Macro-intervalle : $2 \text{ N} \leq F \leq 30 \text{ kN}$;
- Micro-intervalle : $2 \text{ N} > F$; $h > 0,2 \text{ }\mu\text{m}$
- Nano-intervalle : $h \leq 0,2 \text{ }\mu\text{m}$.

Pour la nano-intervalle, la déformation mécanique dépend fortement de la forme réelle de la pointe du pénétrateur, et les paramètres de matériaux calculés sont influencés de manière significative par la fonction d'aire de contact du pénétrateur utilisé sur la machine d'essai. En conséquence, un étalonnage soigné de l'instrument et de la forme du pénétrateur est nécessaire pour obtenir une reproductibilité acceptable des paramètres de matériaux déterminés avec différentes machines.

Les macro- et micro-intervalles se distinguent par les forces d'essai en relation avec la profondeur d'empreinte.

L'attention est attirée sur le fait que le micro-intervalle a une limite supérieure donnée par la force d'essai (2 N) et une limite inférieure donnée par la profondeur d'empreinte de 0,2 μm .

La détermination de la dureté et d'autres paramètres de matériaux est donnée dans l'[Annexe A](#).

L'endommagement du pénétrateur est possible pour les pressions de contact élevées. Pour cette raison, des pénétrateurs en carbure sont souvent utilisés pour la macro-intervalle. Pour les éprouvettes à dureté et module d'élasticité élevés, il convient de tenir compte de l'influence de la déformation du pénétrateur sur le résultat d'essai.

Cette méthode d'essai est également applicable à des revêtements métalliques et non métalliques minces et à des matériaux non métalliques. Dans ce cas, il convient de prendre en compte les spécifications données dans les normes applicables (voir également [6.3](#) de la présente norme et l'ISO 14577-4).

2 Références normatives

Les documents ci-après, en tout ou partie, sont des références normatives dans le présent document et sont indispensables à son application. 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 14577-2:2015, *Matériaux métalliques — Essai de pénétration instrumenté pour la détermination de la dureté et de paramètres des matériaux — Partie 2: Vérification et étalonnage des machines d'essai*

Guide ISO/CEI 98-3:2008, *Incertitude de mesure — Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*

3 Symboles et désignations

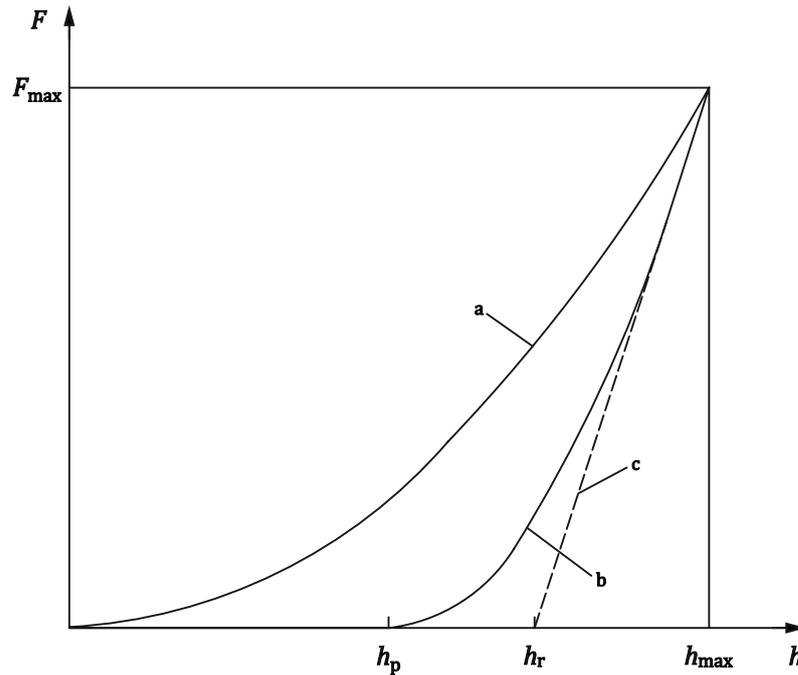
Pour les besoins du présent document, les symboles et les désignations du [Tableau 1](#) doivent être appliqués (voir également [Figure 1](#) et [Figure 2](#)).

Tableau 1 — Symboles et désignations

Symbole	Désignation	Unité
$A_p(h_c)$	Aire de contact projetée du pénétrateur à la distance h_c de la pointe	mm ²
$A_s(h)$	Aire de la surface du pénétrateur à la distance h de la pointe	mm ²
C_{IT}	Fluage de pénétration	%
C_T	Compliance de contact totale mesurée (dh/dF tangente à la courbe de suppression de la force au point correspondant à la force d'essai maximum durant l'essai)	nm/mN
C_F	Compliance de l'instrument	nm/mN
C_S	Compliance de contact après correction de la compliance de la machine	nm/mN
E_{IT}	Module de pénétration de l'éprouvette	GPa
E_r	Module de contact en déformation plane réduite (combinaison des modules en déformation plane de l'éprouvette et du pénétrateur)	GPa
F	Force d'essai	N
F_{max}	Force maximale d'essai	N
h	Profondeur de pénétration sous la force d'essai appliquée	mm
h_c	Profondeur du contact du pénétrateur avec l'éprouvette à F_{max}	mm
h_{max}	Profondeur de pénétration maximale à F_{max}	mm
h_p	Profondeur de pénétration rémanente après suppression de la force d'essai	mm
h_r	Point d'intersection de la tangente c à la courbe b à F_{max} avec l'axe profondeur de pénétration, comme identifié à la Figure 1	mm
H_{IT}	Dureté de pénétration	GPa
HM	Dureté Martens	GPa
HM _s	Dureté Martens, déterminée à partir de la pente de la courbe force croissante/profondeur de pénétration	GPa
HM _{diff}	Dureté Martens, déterminée à partir de la dérivée première de h en fonction de \sqrt{F}	GPa
ν_s	Coefficient de poisson de l'éprouvette	
r	Rayon du pénétrateur sphérique	mm
R_{IT}	Relaxation de pénétration	%
W_{elast}	Travail correspondant à la déformation due au retour élastique lors de la pénétration	N·m
W_{total}	Travail mécanique total	N·m
α	Demi-angle du cône ou angle de facette par rapport à l'axe du pénétrateur pour les pénétrateurs pyramidaux	°
θ	Angle maximum entre la surface de contact et le pénétrateur pour le calcul du déplacement radial	°
η_{IT}	Rapport W_{elast} / W_{total}	%

NOTE 1 De manière à éviter des nombres trop longs, l'utilisation de multiples ou sous-multiples des unités est permise.

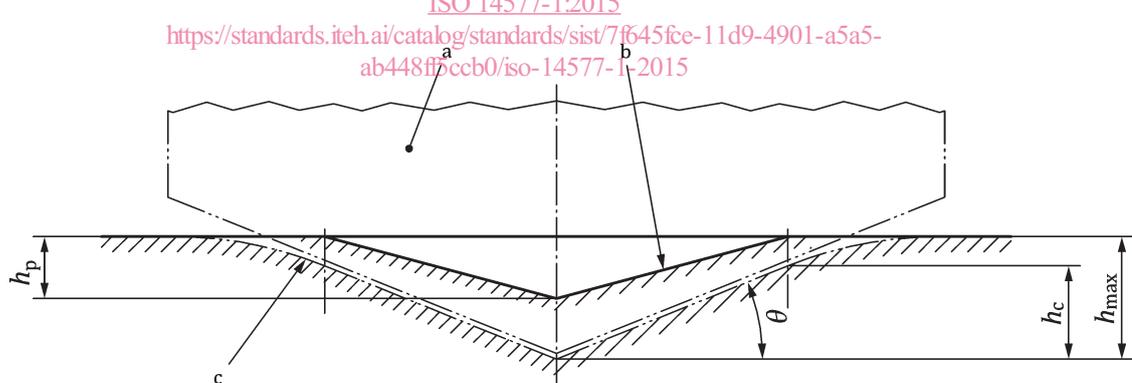
NOTE 2 L'utilisation du N/mm² est encore autorisée. 1 MPa = 1 N/mm².



Légende

- a Application de la force d'essai.
- b Suppression de la force d'essai.
- c Tangente à la courbe b à F_{\max} .

Figure 1 — Représentation schématique du mode opératoire d'essai



Légende

- a Pénétrateur.
- b Surface de la pénétration plastique résiduelle dans l'éprouvette.
- c Surface de l'éprouvette pour les profondeur de pénétration et force d'essai maximales
- θ Angle maximum entre la surface de contact de l'échantillon et le pénétrateur.

Figure 2 — Représentation schématique de la coupe transversale de l'empreinte dans le cas d'un enfoncement du matériau (image à modifier angle θ à ajouter)

4 Principe

L'enregistrement continu de la force et de la profondeur de pénétration permet la détermination de la dureté et des caractéristiques de matériau (voir [Figure 1](#) et [Figure 2](#)). Un pénétrateur constitué d'un

matériau plus dur que le matériau soumis à l'essai doit être utilisé. Les formes et matériaux suivants peuvent être utilisés :

- a) pénétrateur diamant en forme de pyramide droite à base carrée avec un angle $\alpha = 68^\circ$ entre l'axe de la pyramide en diamant et l'une des faces (pyramide Vickers, voir [Figure A.1](#)) ;
- b) pyramide en diamant à base triangulaire (par exemple pyramide Berkovich modifiée avec un angle $\alpha = 65,27^\circ$ entre l'axe de la pyramide en diamant et l'une des faces, voir [Figure A.1](#)) ;
- c) bille carbure (spécialement pour la détermination du comportement élastique des matériaux) ;
- d) pénétrateur diamant à extrémité sphérique.

La présente partie de l'ISO 14577 n'exclut pas l'utilisation d'autres géométries de pénétrateur ; toutefois, il convient d'interpréter avec prudence les résultats obtenus à l'aide de tels pénétrateurs. D'autres matériaux tels que le saphir peuvent également être utilisés.

NOTE En raison de la structure cristalline du diamant, les pénétrateurs qui sont destinés à être sphériques, sont souvent des polyèdres et n'ont pas une forme sphérique idéale.

Le mode opératoire d'essai peut être soit à force contrôlée, soit à déplacement contrôlé. La force d'essai, F , la profondeur de pénétration correspondante, h , et le temps sont enregistrés pendant toute la durée de l'essai. L'ensemble des données relatives à la force d'essai et à la profondeur de pénétration correspondante en fonction du temps constitue le résultat de l'essai (voir [Figure 1](#) et [Annexe B](#)).

Pour que la détermination de la force et de la profondeur de pénétration correspondante soit reproductible, il faut fixer le point zéro pour le mesurage des forces/profondeurs de pénétration, individuellement pour chaque essai (voir [7.3](#)).

ITeCh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

Si des effets dépendant du temps sont mesurés :

- lorsque la méthode à force contrôlée est utilisée, la force d'essai est maintenue constante pendant une durée spécifiée et le changement de la profondeur de pénétration est mesuré en fonction du temps de maintien de la force d'essai (voir [Figures A.3](#) et [B.1](#)), et
- lorsque la méthode à profondeur de pénétration contrôlée est utilisée, la profondeur de pénétration est maintenue constante pendant un temps spécifié et la modification de la force d'essai est mesurée en fonction du temps de maintien de la profondeur de pénétration (voir [Figures A.4](#) et [B.2](#)).

Les deux types de contrôles mentionnés donnent des résultats différents, essentiellement pour les zones b des courbes des [Figures B.1 a\)](#) et [B.2 b\)](#) ou des [Figures B.1 b\)](#) et [B.2 a\)](#).

5 Machine d'essai

5.1 La machine d'essai doit pouvoir appliquer des forces d'essai prédéterminées dans la gamme requise et doit être conforme aux prescriptions de l'ISO 14577-2.

5.2 La machine d'essai doit pouvoir mesurer et enregistrer la force appliquée, la pénétration et le temps, pendant tout le cycle d'essai.

5.3 La machine d'essai doit pouvoir compenser la compliance de la machine et utiliser la fonction d'aire appropriée du pénétrateur (voir [Annexe C](#) et 4.5 et 4.6 de l'ISO 14577-2:2015).

5.4 Les pénétrateurs à utiliser avec les machines d'essai peuvent avoir diverses formes, comme spécifié dans l'ISO 14577-2. (Pour des informations complémentaires sur les pénétrateurs en diamant, voir [Annexe D](#).)

5.5 La machine d'essai doit être utilisée à une température comprise dans l'intervalle admissible spécifié en 7.1, et doit conserver son étalonnage dans les limites prescrites dans l'Article 4 de l'ISO 14577-2:2015.

6 Éprouvette

6.1 L'essai doit être réalisé dans une zone de la surface d'essai qui permet la détermination de la courbe force/profondeur de pénétration pour la plage de pénétration correspondante à l'intérieur de l'incertitude requise. La surface de contact doit être exempte de fluides et de lubrifiants, sauf si cela est essentiel pour la réalisation de l'essai. Dans ce cas, cela doit être décrit en détail dans le rapport d'essai. Il faut prendre soin de ne pas apporter de matières étrangères (par exemple particules de poussières) dans la zone de contact.

En général, pour autant que la surface soit exempte d'une contamination évidente de la surface, il convient d'éviter des procédures de nettoyage. Si un nettoyage est requis, il doit être limité à des méthodes qui minimisent les endommagements, par exemple :

- application d'un courant de gaz sec, exempt d'huile et filtré ;
- application d'un courant de particules de CO₂ se sublimant (en évitant une température de surface en dessous du point de rosée) ;
- rincer avec un solvant (qui est chimiquement inerte vis à vis de l'éprouvette) puis sécher.

Si ces méthodes échouent et que la surface est suffisamment robuste, la surface peut être essuyée avec un tissu sans peluche imbibé de solvant afin d'enlever les particules de poussière piégées et, après cela, la surface doit être rincée dans un solvant comme décrit précédemment.

Il convient d'utiliser seulement avec précaution des méthodes par ultrasons qui sont connues pour créer ou accroître l'endommagement des surfaces et des revêtements.

Pour une explication concernant l'influence de la rugosité de l'éprouvette sur l'incertitude des résultats, voir [Annexe E](#). Le fini de surface a une influence significative sur les résultats d'essai.

Les surfaces d'essai doivent être perpendiculaires à la direction de la force d'essai. Il est recommandé que l'écart de perpendicularité de la surface d'essai soit inférieur à 1°. Il convient d'inclure l'écart dans le calcul d'incertitude.

6.2 La préparation de la surface d'essai doit être effectuée de façon que toute altération de la dureté de la surface et/ou toute contrainte résiduelle de surface (par exemple par échauffement ou par écrouissage) soient minimisées.

Compte tenu des faibles profondeurs de pénétration dans les micro- et nano-intervalles, il faut prendre des précautions particulières lors de la préparation de l'éprouvette. Un procédé de polissage adapté aux matériaux particuliers doit être utilisé.

6.3 L'épaisseur de l'éprouvette doit être suffisamment grande (ou la profondeur de pénétration suffisamment petite) pour que le résultat d'essai ne soit pas influencé par l'appui de l'éprouvette. Il convient que l'épaisseur de l'éprouvette soit au moins égale à la plus élevée des deux valeurs entre $10 \times$ la profondeur de pénétration ou à $3 \times$ le diamètre de l'empreinte (voir 7.7).

Pour les essais sur revêtements, il convient de considérer que l'épaisseur de l'éprouvette est l'épaisseur du revêtement. Pour les essais sur les revêtements, voir ISO 14577-4.

NOTE Ce qui précède correspond à des limites établies de manière empirique. Les limites précises de l'influence de l'appui sur l'éprouvette dépendent de la géométrie du pénétrateur utilisé et des caractéristiques des matériaux de l'éprouvette et de l'appui.

7 Mode opératoire

7.1 La température de l'essai doit être enregistrée. Typiquement, les essais sont réalisés à température ambiante comprise entre 10 °C et 35 °C.

La stabilité de la température durant un essai est plus importante que la température d'essai effective. Toute correction de l'étalonnage appliquée doit être indiquée dans le rapport d'essai avec l'incertitude d'étalonnage complémentaire. Il est recommandé que les essais, en particulier ceux dans les nano et micro-intervalles, soient réalisés dans des conditions contrôlées dans l'intervalle de (23 ± 5) °C et à une humidité relative de (45 ± 10) %.

Toutefois, les essais individuels doivent être réalisés dans des conditions stables de température en raison de la prescription d'exactitude élevée du mesurage de la profondeur. Cela signifie que:

- les éprouvettes doivent atteindre la température ambiante avant d'être soumises à l'essai ;
- la machine d'essai doit avoir atteint une température opérationnelle stable (il convient de consulter le manuel d'utilisation) ;
- la température ambiante, la température de l'instrument et la température d'essai doivent se situer dans l'intervalle pour lequel l'étalonnage de la machine est valable, et
- les autres influences extérieures provoquant des changements de température pendant un essai individuel ont été contrôlées.

Pour réduire au minimum la dérive du déplacement induite thermiquement, la température de la machine d'essai doit être maintenue de manière adéquate pendant la durée du cycle d'essais, ou la dérive du déplacement doit être mesurée et corrigée. Un arbre de décision pour aider à estimer la dérive pendant l'expérimentation, est donné à la [Figure 3](#). Si la vitesse de dérive est significative, les données relatives au déplacement doivent être corrigées en mesurant la vitesse de la dérive pendant un maintien à une force appliquée aussi proche que possible de zéro ou pendant un maintien à un point donné de la courbe de suppression de la force (voir [Annexe G](#) et 4.3.3 de l'ISO 14577-2:2015). Si un contact dans le régime purement élastique peut être obtenu, un maintien au contact initial est préférable. De cette façon, les influences du matériau (fluage, visco-plasticité, fissuration) peuvent être minimisées. L'incertitude sur la dérive ou sur la correction de la dérive doit être indiquée dans le rapport d'essai.

NOTE Pour déterminer la dérive des instruments comportant une surface de référence, un contact élastique entre la référence et la surface est suffisant ; un contact du pénétrateur avec la surface n'est pas requis et n'est pas recommandé.

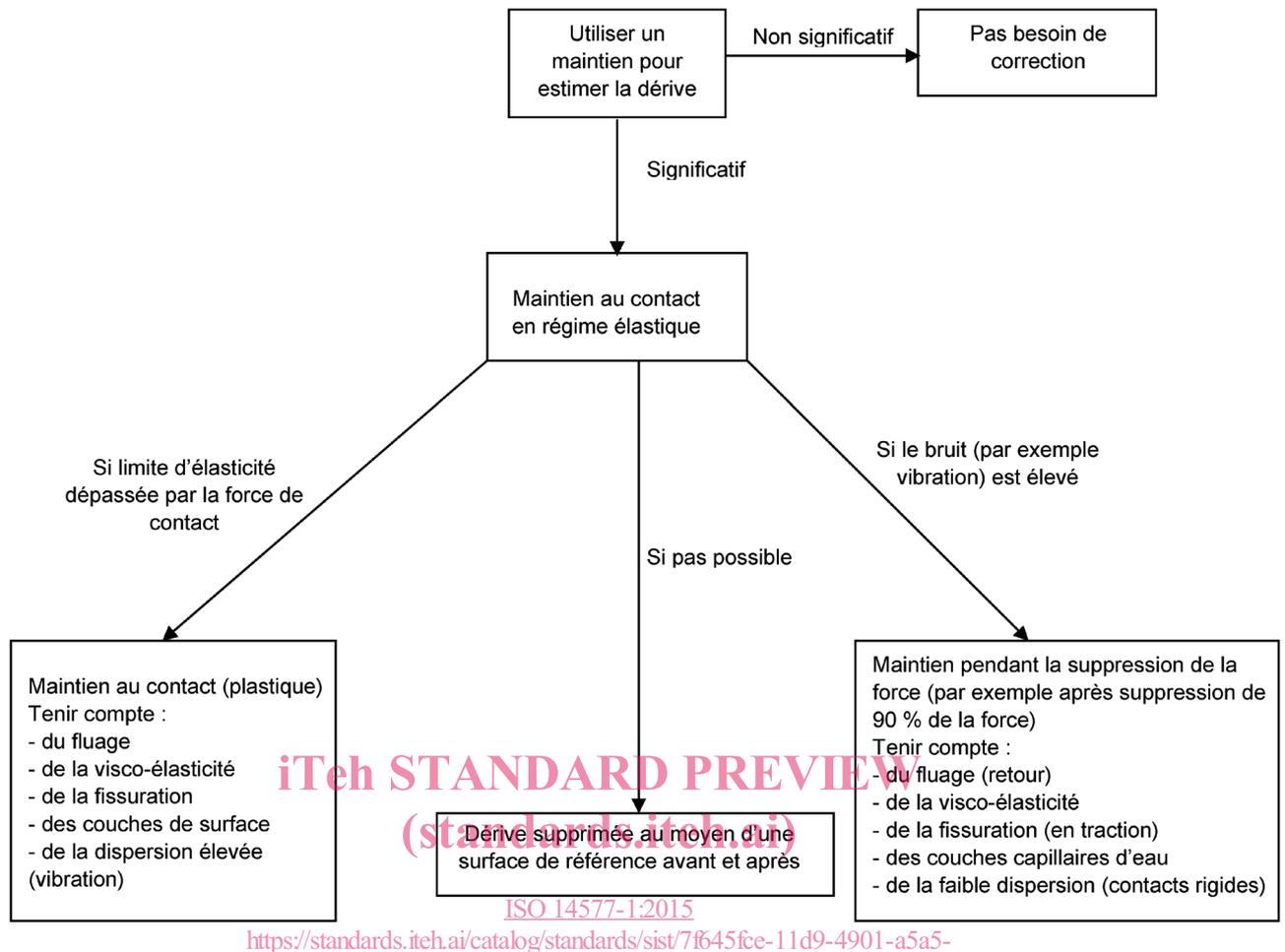


Figure 3 — Arbre de décision pour aider à estimer la dérive thermique au moyen d'une période de maintien à force constante

7.2 L'éprouvette doit être fermement supportée de façon qu'il n'y ait pas d'augmentation de la compliance de la machine d'essai. L'éprouvette doit être placée sur un appui rigide dans la direction de la pénétration ou être fixée dans un porte-éprouvette approprié. Les surfaces de contact entre l'éprouvette, l'appui et le porte-éprouvette doivent être exemptes de matières étrangères qui pourraient augmenter la compliance (réduire la rigidité) de l'appui de l'éprouvette.

NOTE Si l'échantillon est en appui sur des matériaux ou avec des méthodes de montage autres que ceux utilisés pour déterminer la compliance de la machine, ainsi, la réponse élastique de ces matériaux et de ces méthodes de montage peut entraîner une compliance supplémentaire.

7.3 Le point zéro pour le mesurage de la courbe force/profondeur de pénétration doit être fixé individuellement pour chaque ensemble de données d'essai. Il représente le premier contact du pénétrateur avec la surface de l'éprouvette. L'incertitude sur le point zéro doit être indiquée dans le rapport d'essai. Il convient que l'incertitude concernant le point zéro fixé ne dépasse pas 1 % du déplacement maximal de pénétration pour les macro et micro-intervalles. L'incertitude du point zéro pour le nano-intervalle peut dépasser 1 % ; dans ce cas, la valeur doit être estimée.

- a) Méthode 1: Le point zéro est calculé par extrapolation d'une fonction lissée à partir de la courbe d'application de la force (voir courbe a de la [Figure 1](#)) ; un lissage au moyen d'une loi puissance avec l'exposant comme paramètre d'ajustement maintenu dans l'intervalle $1 \leq m \leq 2$ est recommandé. Le lissage doit être appliqué aux valeurs dans l'intervalle entre le premier point de données enregistré et pas plus de 10 % de la profondeur de pénétration maximale. Le premier point de données enregistré doit correspondre à moins de 2 % de F_{\max} ou à moins de 5 % de la profondeur de pénétration maximale et les données lissées ne doivent pas contenir de changement dans la réponse

en pénétration telle qu'un début de plastification. Il est recommandé que le premier point de données enregistré soit aussi proche que possible du point zéro. L'incertitude du point zéro calculé résulte des paramètres du lissage, de la fonction de lissage et de la longueur de l'extrapolation. L'incertitude est calculée comme l'erreur type pour l'intersection de la courbe lissée avec l'axe correspondant à la force nulle.

NOTE 1 La première partie de la courbe de pénétration (par exemple jusqu'à 5 % de h_{\max}) peut être affectée par les vibrations ou d'autres bruits.

- b) Méthode 2: Le point zéro est le point de contact déterminé pendant le premier accroissement de la force d'essai ou de la rigidité du contact. À ce point de contact, l'incrément en force ou en déplacement doit être suffisamment petit pour que l'incertitude sur le point zéro soit inférieure à la limite requise.

NOTE 2 Des valeurs typiques du petit incrément de force sont de $10^{-4}F_{\max}$ pour la macro-intervalle et sont inférieures à 5 μN pour les micro et macro-intervalles.

7.4 Le cycle d'essai peut être soit à force contrôlée, soit à profondeur de pénétration contrôlée. Les paramètres contrôlés peuvent varier soit en continu, soit par paliers. Une description complète de toutes les parties du cycle d'essai doit être indiquée dans le rapport d'essai, y compris :

- a) le type de contrôle (c'est-à-dire contrôle en force ou en déplacement, et s'il y a modification des paramètres contrôlés par paliers ou en continu) ;
- b) la force maximale (ou le déplacement maximal) ;
- c) la fonction d'application de la force (ou du déplacement) ;
- d) la longueur et la position de chaque période de maintien ;
- e) la fréquence d'acquisition des données (ou le nombre de points expérimentaux).

NOTE Un exemple de cycle pour les nano et micro-intervalles est : temps d'application de la force 30 s ; temps de maintien à F_{\max} 30 s ; temps de suppression de la force 10 s. Un temps de maintien de 60 s pour mesurer la dérive thermique peut également être nécessaire (voir [Annexe G](#)).

Le temps passé pour effectuer l'essai peut avoir une influence sur les résultats obtenus. De façon à obtenir des résultats d'essai comparables, on doit tenir compte du temps utilisé pour l'essai.

7.5 La force d'essai doit être appliquée sans choc ni vibration susceptible d'affecter significativement les résultats d'essai jusqu'à ce que la force d'essai soit appliquée ou le déplacement en pénétration atteigne la valeur prescrite. La force et le déplacement doivent être enregistrés à des intervalles prescrits, indiqués dans le rapport d'essai.

Lors de la détermination du point de contact du pénétrateur avec l'éprouvette, il convient que la vitesse d'approche du pénétrateur soit faible afin que les caractéristiques mécaniques de la surface ne soient pas modifiées par l'impact. Pour des empreintes pour le micro-intervalle, il convient qu'elle ne dépasse pas 2 $\mu\text{m/s}$. Des vitesses d'approche typiques pour les micro et nano-intervalles sont de 10 nm/s à 20 nm/s ou inférieures durant l'approche finale.

NOTE À présent, la limite exacte de la vitesse d'approche pour la macro-intervalle n'est pas connue. Il est recommandé que les utilisateurs indiquent la vitesse d'approche dans le rapport d'essai.

Les ensembles de données force/profondeur de pénétration/temps ne sont comparables que si le même pénétrateur et le même cycle (profil) d'essai est utilisé. Le profil d'essai doit être prescrit en termes de force d'essai appliquée ou de déplacement en pénétration en fonction du temps. Les deux cycles les plus courants sont :

- a) vitesse constante d'application de la force d'essai, et
- b) vitesse constante de déplacement en pénétration.

La vitesse de suppression de la force d'essai appliquée est soumise à la condition qu'un nombre suffisant de points expérimentaux soit enregistré pendant la suppression de la force d'essai appliquée en vue de toute analyse ultérieure et que le fluage total ou tout fluage résiduel reste dans des limites acceptables (voir [Annexe G](#)).

Si la vitesse de dérive est significative (voir [7.1](#) et [Annexe G](#)), les données de force et de profondeur doivent être corrigées en utilisant la vitesse de dérive mesurée.

7.6 Tout au long de l'essai, la machine d'essai doit être protégée des chocs et vibrations, des courants d'air et des variations de température susceptibles d'influencer significativement le résultat d'essai.

7.7 Il est important que les résultats d'essai ne soient pas affectés par la présence d'une interface, d'une surface libre ou par toute déformation plastique produite par une empreinte précédente au cours d'une série. L'effet de l'un quelconque de ces facteurs dépend de la géométrie du pénétrateur et des caractéristiques des matériaux composant l'éprouvette. Les empreintes doivent se situer à une distance des interfaces ou surfaces libres d'au moins trois fois leur diamètre, et la distance minimale entre les empreintes doit être d'au moins cinq fois le diamètre le plus grand de l'empreinte.

Le diamètre de l'empreinte est le diamètre, dans le plan à la surface de l'éprouvette, de l'impression circulaire d'une empreinte produite par un pénétrateur sphérique. Pour les impressions non circulaires, le diamètre d'empreinte est le diamètre du plus petit cercle capable de circonscrire l'empreinte. Des fissures accidentelles peuvent se produire aux coins de l'empreinte. Dans ce cas, il convient d'inclure la fissure dans le diamètre de l'empreinte.

Les distances minimales spécifiées conviennent mieux aux matériaux céramiques et aux métaux tels que le fer et ses alliages. Pour d'autres matériaux, il est recommandé d'utiliser des distances d'au moins dix fois le diamètre d'empreinte. (standards.iteh.ai)

En cas de doute, il est recommandé que les valeurs de la première empreinte soient comparées à celles des empreintes ultérieures de la série. Si une différence importante est constatée, il se peut que les empreintes soient trop rapprochées et il convient d'accroître la distance. Un accroissement de la distance par un facteur deux est suggéré.

Il peut être souhaitable de mesurer les revêtements de faibles épaisseurs dans la section (par exemple pour éviter des problèmes dus à la rugosité de surface). Dans ce cas, l'épaisseur du revêtement peut être insuffisante pour respecter les prescriptions d'espacement minimal telles que spécifiées ci-avant. De plus faibles espacements peuvent être utilisés si l'on dispose d'une preuve expérimentale que cela n'influence pas significativement les ensembles de données force/profondeur de pénétration/temps par comparaison à des empreintes correctement espacées sur des éprouvettes similaires avec des revêtements plus épais.

8 Incertitude des résultats

Une évaluation complète de l'incertitude doit être effectuée conformément au Guide ISO/CEI 98-3. Une description détaillée de deux méthodes d'évaluation de l'incertitude est donnée à l'[Annexe H](#).

Méthode 1 : Cette approche pour déterminer l'incertitude considère seulement les incertitudes associées à la performance globale des mesurages de la machine d'essai par rapport aux blocs de référence (désignés par MRC sous forme abrégée ci-après). Ces incertitudes de performance reflètent l'effet combiné de toutes les incertitudes individuelles (vérification indirecte). Lorsqu'on utilise cette approche, il est important que, durant l'essai, les composants individuels de la machine fonctionnent exactement de la même façon dans les tolérances que lors de la validation indirecte utilisées pour estimer les incertitudes.

Méthode 2 : Cette approche calcule une incertitude combinée à partir de contributions individuelles. Celles-ci peuvent être groupées en incertitudes aléatoires et incertitudes systématiques. Les paramètres individuels peuvent contribuer à l'un ou aux deux types d'incertitude pour la détermination de l'incertitude totale de mesure. Ainsi, l'incertitude pour le déplacement mesuré peut avoir une composante aléatoire due à la résolution de l'échelle utilisée et au bruit lié aux vibrations etc. plus une