
**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**

(standards.iteh.ai)

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

<https://standards.iteh.org/catalog/standards/sist/21b458c0-9300-4906-91c4-bd0f44edf256/iso-14577-2-2015>
Part 2: Verification and calibration of testing machines



iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 14577-2:2015

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/21b458c0-9309-490f-91c4-bd0f44edf256/iso-14577-2-2015>



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 Conditions générales	1
3.1 Préparation.....	1
3.2 Installation fonctionnelle.....	2
3.3 Pénétrateur.....	2
3.4 Application de la force d'essai.....	2
4 Etalonnage et vérification directe	2
4.1 Généralités.....	2
4.2 Étalonnage de la force d'essai.....	3
4.3 Étalonnage du dispositif de mesure du déplacement.....	3
4.4 Etalonnage et vérification de la compliance de la machine.....	4
4.4.1 Généralités.....	4
4.4.2 Mode opératoire.....	4
4.5 Etalonnage et vérification du pénétrateur.....	5
4.5.1 Généralités.....	5
4.5.2 Pénétrateur Vickers.....	6
4.5.3 Pénétrateur Berkovich, pénétrateur Berkovich modifié et pénétrateur en forme de trièdre.....	8
4.5.4 Pénétrateurs à bille carbure.....	8
4.5.5 Pénétrateurs de forme conique à pointe sphérique.....	9
4.6 Vérification de la fonction d'aire du pénétrateur.....	11
4.6.1 Généralités.....	11
4.6.2 Mode opératoire.....	11
4.7 Vérification du cycle d'essai.....	11
5 Vérification indirecte	11
5.1 Généralités.....	11
5.2 Mode opératoire.....	13
6 Intervalles entre les étalonnages et les vérifications	14
6.1 Etalonnage et vérification.....	14
6.2 Vérification indirecte.....	15
6.3 Vérification de routine.....	15
7 Rapport de vérification/certificat d'étalonnage	15
Annexe A (informative) Exemple de porte-pénétrateur	16
Annexe B (normative) Modes opératoires pour la détermination de la fonction d'aire du pénétrateur	17
Annexe C (informative) Exemples pour la documentation des résultats de la vérification indirecte	20
Annexe D (normative) Procédure d'étalonnage de la compliance du bâti	22
Bibliographie	26

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 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'OMC concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir le lien suivant: [Avant-propos — Informations supplémentaires](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/216438cc-9309-4901-91c4-bd0f44edf256/iso-14577-2-2015).

L'ISO 14577-2 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 14577-2:2002), 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 élastoplastique. 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 qui peut être 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 14577-2:2015](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/21b458c0-9309-490f-91c4-bd0f44edf256/iso-14577-2-2015)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/21b458c0-9309-490f-91c4-bd0f44edf256/iso-14577-2-2015>

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 14577-2:2015

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/21b458c0-9309-490f-91c4-bd0f44edf256/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

1 Domaine d'application

La présente partie de l'ISO 14577 spécifie la méthode de vérification et d'étalonnage des machines d'essai destinées à la réalisation de l'essai de pénétration instrumenté conformément à l'ISO 14577-1:2015.

Elle décrit une méthode de vérification directe pour contrôler les fonctions principales de la machine d'essai et une méthode de vérification indirecte appropriée pour la détermination de la répétabilité de la machine d'essai. Il est exigé que la méthode indirecte soit utilisée en sus de la méthode directe et pour le contrôle de routine périodique de la machine d'essai en service.

Il est exigé que la méthode indirecte de vérification de la machine d'essai soit réalisée de façon indépendante pour chaque méthode d'essai.

La présente partie de l'ISO 14577 est également applicable aux machines d'essai transportables.

2 Références normatives

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/21b458c0-9309-490f-91c4-bd0914edf256/iso-14577-2-2015>

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 376, *Matériaux métalliques — Étalonnage des instruments de mesure de force utilisés pour la vérification des machines d'essais uniaxiaux*

ISO 3878, *Métaux-durs — Essai de dureté Vickers*

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*

ISO 14577-3, *Matériaux métalliques — Essai de pénétration instrumenté pour la détermination de la dureté et de paramètres des matériaux — Partie 3: Étalonnage des blocs de référence*

3 Conditions générales

3.1 Préparation

La machine doit être conçue de manière à ce qu'elle puisse être vérifiée.

Avant vérification et étalonnage de la machine d'essai, elle doit être contrôlée pour s'assurer que les conditions indiquées en 3.2 à 3.4 sont satisfaites.

3.2 Installation fonctionnelle

La machine d'essai doit être configurée pour fonctionner conformément aux exigences de la présente partie de l'ISO 14577, de l'ISO 14577-1:2015 et, le cas échéant, de l'ISO 14577-3, et doit être installée dans un environnement qui satisfait ces exigences. La machine d'essai doit être protégée des vibrations. Pour les essais dans les micro et nano-intervalles, la machine d'essai doit également être protégée des courants d'air et des fluctuations de température.

L'influence de l'environnement sur les données, par exemple, le seuil de bruit doit être estimé en réalisant une empreinte avec faible force (par exemple équivalente à la force de contact initial courante) sur un MRC et en analysant le déplacement en fonction du temps. La variabilité de la force est la rigidité de l'empreinte (obtenue à partir de la courbe de suppression de la force) multipliée par l'écart-type du déplacement une fois que la dérive de fond pour le déplacement moyen a été dérivée. Ces incertitudes doivent alors être incluses dans les essais de détermination de l'incertitude combinée totale telles que calculées dans l'Article 8 et l'Annexe H de l'ISO 14577-1:2015.

3.3 Pénétrateur

Afin d'obtenir des mesurages répétables de la série de données force/profondeur de pénétration, le porte-pénétrateur doit être solidement fixé à la machine d'essai.

Il convient de concevoir le porte-pénétrateur de manière que la contribution à la compliance globale soit minimisée (voir [Annexe A](#)).

3.4 Application de la force d'essai

La force d'essai doit être appliquée et supprimée sans choc ou vibration qui pourrait influencer d'une manière significative les résultats d'essai. Il doit être possible de vérifier le processus d'accroissement, de maintien et de suppression de la force d'essai.

ISO 14577-2:2015
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/21b458c0-9309-490f-91c4-b30814edf256/iso-14577-2-2015>

4 Etalonnage et vérification directe

4.1 Généralités

4.1.1 L'étalonnage et la vérification directe doivent être effectués à la température constante d'utilisation, typiquement 10 °C à 35 °C mais de préférence dans l'intervalle (23 ± 5) °C. Si une gamme de températures de fonctionnement est requise, il convient alors de procéder à l'étalonnage et à la vérification directe pour des points appropriés dans cette gamme de température pour déterminer la validité de l'étalonnage en fonction de la température. Si nécessaire, une fonction de correction de l'étalonnage ou un ensemble d'étalonnages valables à des températures de fonctionnement spécifiques peuvent être déterminés.

4.1.2 Les instruments utilisés pour l'étalonnage et la vérification directe doivent pouvoir être raccordés à des normes nationales, pour autant qu'elles soient disponibles.

4.1.3 L'étalonnage et la vérification directe comprend:

- a) l'étalonnage de la force d'essai;
- b) l'étalonnage du dispositif de mesure du déplacement;
- c) l'étalonnage et la vérification de la compliance de la machine;
- d) la vérification du pénétrateur;
- e) la vérification de la fonction d'aire du pénétrateur, si la profondeur de pénétration est inférieure à 6 µm, et
- f) la vérification du cycle d'essai.

4.2 Étalonnage de la force d'essai

4.2.1 Chaque gamme de force utilisée doit être étalonnée sur tout l'intervalle de force pour l'application et la suppression de la force d'essai. Un minimum de 16 points également distribués sur l'étendue de force d'essai doit être étalonné c'est-à-dire 16 lors de l'application et 16 lors de la suppression de la force d'essai. Le mode opératoire doit être répété au moins trois fois et la valeur moyenne d'étalonnage doit être utilisée. La différence maximale dans les valeurs d'étalonnage ne doit pas dépasser la moitié des tolérances données dans le [Tableau 1](#).

4.2.2 La force d'essai doit être mesurée par une méthode raccordée, par exemple:

- mesure au moyen d'un instrument de mesure de force élastique, de classe 1 ou meilleure conformément à l'ISO 376;
- équilibrage par rapport à une force, avec une exactitude de $\pm 0,2$ %, appliquée au moyen de masses étalonnées avec gain mécanique;
- équilibrage électronique, avec une exactitude appropriée de 0,1 % de la force d'essai maximale, ou 10 μg (0,1 μN) pour le nano-intervalle.

Pour chaque point mesuré utilisé pour l'étalonnage, la différence entre la force d'essai mesurée et la force d'essai nominale doit être dans les tolérances données dans le [Tableau 1](#).

Tableau 1 — Tolérances pour les forces d'essai

Etendue de force d'essai F N	Tolérances %
$F \geq 2$	$\pm 1,0$
$0,001 \leq F < 2$	$\pm 1,0$
$F < 0,001$	$\pm 2,5^a$

^a Pour le nano-intervalle, la tolérance de ± 1 % est fortement recommandée.

4.3 Étalonnage du dispositif de mesure du déplacement

4.3.1 La résolution requise du système de mesure du déplacement dépend de la dimension de la plus petite profondeur de pénétration à mesurer. En ce qui concerne la micro-intervalle, cette valeur est de $h = 0,2 \mu\text{m}$, et pour le micro-intervalle elle est généralement $\geq 2 \mu\text{m}$.

L'échelle du dispositif de mesure du déplacement doit être graduée de façon à permettre une résolution pour la mesure de la profondeur de pénétration conforme au [Tableau 2](#).

4.3.2 Le dispositif de mesure du déplacement doit être étalonné sur la machine d'essai pour chaque étendue utilisée au moyen d'une méthode appropriée et d'un système correspondant. Le dispositif doit être étalonné en au moins 16 points dans chaque direction, également distribués tout au long de la course. Le mode opératoire doit être répété trois fois.

Les méthodes suivantes sont recommandées pour le mesurage du déplacement relatif du pénétrateur: méthode d'interférométrie laser, méthode inductive, méthode capacitive, méthode avec capteur piézoélectrique.

Pour chaque point mesuré utilisé pour l'étalonnage, la différence entre le déplacement mesuré et le déplacement nominal doit se situer dans les tolérances données dans le [Tableau 2](#).

Tableau 2 — Résolution et tolérances du dispositif de mesure du déplacement

Intervalle d'application	Résolution du dispositif de mesure de la profondeur nm	Tolérances
Macro	≤ 100	1 % de h
Micro	≤ 10	1 % de h
Nano	≤ 1	2 nm ^a
^a Pour le nano-intervalle, une tolérance de < 1 % de h (profondeur de pénétration) est fortement recommandée.		

4.3.3 Les changements de température sont communément une source prépondérante de dérive du déplacement. Pour minimiser la dérive du déplacement induite thermiquement, la température de l'instrument doit être maintenue de manière que la vitesse de la dérive du déplacement demeure constante pendant la durée d'un cycle d'étalonnage. La vitesse de dérive doit être mesurée pendant, immédiatement avant ou immédiatement après chaque cycle d'étalonnage, par exemple en surveillant le déplacement pendant une période de maintien appropriée. Les données d'étalonnage du déplacement doivent être corrigées pour la dérive thermique et le produit de la variation de la vitesse de la dérive et de la durée d'un cycle d'étalonnage doit être inférieur à la tolérance donnée dans le [Tableau 2](#). L'incertitude relative à la vitesse doit être incluse dans le calcul de l'incertitude d'étalonnage du déplacement.

4.4 Etalonnage et vérification de la conformité de la machine

4.4.1 Généralités

Voir l'[Annexe D](#) de la présente norme et l'[Annexe C](#) de l'ISO 14577-1:2015.

Cette vérification et cet étalonnage doivent être effectués après que la force d'essai et le système de mesure du déplacement aient été étalonnés conformément à [4.2](#) et [4.3](#).

4.4.2 Mode opératoire

L'étalonnage et la vérification de la conformité de la machine sont réalisés par le mesurage du module de pénétration pour au moins cinq forces d'essai différentes. La méthode 3 conformément à l'[Annexe D](#) est recommandée.

Un Matériau de Référence Certifié (MRC) approprié doit être monté dans le système d'essai de pénétration instrumenté de la même manière que les futurs échantillons d'essai seront montés. Ceci est pour s'assurer que le MRC fournit une reproduction fidèle de la conformité totale spécifique de la machine.

La conformité de la machine d'essai peut être influencée par la conception et le montage particuliers d'un pénétrateur et également par la méthode utilisée pour disposer un échantillon. Par exemple, des montages en plastique (par exemple PVC) peuvent introduire une conformité supplémentaire dans la boucle de mesure. Il convient d'effectuer la vérification et l'étalonnage de la conformité de la machine au moyen d'un pénétrateur qui sera utilisé pour les mesures ultérieures.

Pour des profondeurs de pénétration $h_c \geq 6 \mu\text{m}$, il n'est pas nécessaire de prendre en compte la fonction d'aire de contact réelle. Pour la vérification et l'étalonnage de la conformité de la machine, on doit utiliser un matériau de référence avec valeur de module de pénétration certifiée, qui est indépendante de la profondeur de pénétration (par exemple un matériau avec un rapport $E/\sqrt{H_{IT}}$ élevé (tel que le tungstène) est recommandé. La gamme pour les forces d'essai est définie par la force d'essai minimale correspondant à une profondeur de pénétration de $6 \mu\text{m}$ et la force d'essai maximale possible de la machine d'essai. Les profondeurs de pénétration élevées ont l'avantage que les erreurs sur la fonction d'aire sont susceptibles d'être plus petites, toutefois, il faut prendre soin que l'essai ne soit pas biaisé par un tassement du matériau de référence. La conformité mesurée de l'empreinte peut alors être comparée

à la compliance calculée pour l'empreinte au moyen de la valeur certifiée du module. Pour réétalonner la compliance du bâti, la différence détectée pour la compliance du bâti est appliquée aux données de déplacement pour affiner l'estimation de la profondeur de contact et donc l'estimation de la compliance du bâti pour chaque force. Ce processus fait l'objet d'une itération jusqu'à ce qu'une valeur auto-cohérente de la compliance du bâti et de la profondeur de contact soit obtenue.

Pour des profondeurs de pénétration $< 6 \mu\text{m}$, la méthode mentionnée ci-avant doit être appliquée, sauf que l'aire effective de contact, calculée à partir de la fonction d'aire étalonnée, doit être utilisée pour calculer la compliance du contact au moyen du module certifié du MRC.

Pour de nombreux instruments pour les nano et micro-intervalles, la valeur de la compliance du bâti est indépendante de la force. Cependant, si ce n'est pas le cas, une fonction de compliance du bâti peut alors être déterminée au moyen de la procédure ci-avant mais avec une gamme plus large de forces. La gamme pour les forces d'essai est définie par les profondeurs de pénétration $> 0,5 \mu\text{m}$ et la force d'essai maximale de la machine d'essai ou la force d'essai maximale pour laquelle aucune réponse inhabituelle de l'éprouvette (par exemple tassement des métaux ou fissuration de céramiques ou de verres) ne se produit.

Si la compliance du bâti est réétalonnée, une vérification indirecte doit alors être réalisée avant utilisation.

Les procédures d'étalonnage détaillées dans l'[Annexe D](#) exigent l'utilisation de matériaux de référence (voir ISO 14577-3) qui doivent être isotropes et homogènes. Le module de pénétration et le coefficient de Poisson sont supposés être indépendants de la profondeur de pénétration.

4.5 Etalonnage et vérification du pénétrateur

STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

4.5.1 Généralités

Le pénétrateur utilisé pour l'essai de pénétration doit être étalonné. La preuve que le pénétrateur est conforme aux prescriptions de la présente partie de l'ISO 14577 doit être apportée par un certificat d'étalonnage émis par un laboratoire d'étalonnage qualifié et par la preuve à partir de la vérification indirecte la plus récente que la fonction d'aire du pénétrateur n'a pas été modifiée. Cette dernière doit être apportée au moyen de méthodes de vérification décrites dans l'[Annexe B](#) et de matériaux de référence certifiés appropriés. Toutes les valeurs spécifiques des paramètres géométriques du pénétrateur doivent être mesurées et incorporées dans le certificat d'étalonnage.

Si l'angle du pénétrateur s'écarte de la valeur nominale pour une géométrie idéale du pénétrateur, il convient que la moyenne des angles certifiés pour le pénétrateur en question soit utilisée dans tous les calculs applicables pour des profondeurs $h > 6 \mu\text{m}$.

NOTE Une erreur de $0,2^\circ$ dans l'angle Vickers de 136° (2α) entraîne une erreur systématique de 1 % pour l'aire.

Les pénétrateurs pour utilisation dans le nano-intervalle et dans le micro-intervalle, profondeurs de pénétration $< 6 \mu\text{m}$, doivent avoir leur fonction d'aire étalonnée sur les plages de profondeurs de pénétration utilisées. La performance du pénétrateur doit être vérifiée périodiquement (voir [Article 6](#)).

Lorsque des pénétrateurs qui ne sont pas en diamant sont utilisés, les valeurs du module d'élasticité et du coefficient de Poisson doivent être obtenues et utilisées à la place des valeurs pour le diamant dans les analyses appropriées.

L'angle des pénétrateurs de formes pyramidale et conique doit être mesuré dans les plages de profondeurs de pénétration données dans le [Tableau 3](#) et illustrées à la [Figure 1](#).

Tableau 3 — Valeurs pour les intervalles de mesure relatives à l'angle des pénétrateurs de formes pyramidale et conique

Dimensions en micromètres

Profondeur de pénétration	Macro-intervalle	Micro-intervalle
h_1	6	0,2
h_2	200	Profondeur de pénétration maximale spécifiée

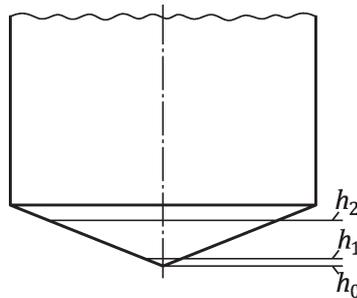


Figure 1 — Illustration des intervalles de mesure données au Tableau 3

4.5.2 Pénétrateur Vickers

4.5.2.1 Les quatre faces du diamant en forme de pyramide droite à base carrée doivent être polies et exemptes de défauts de surface et d'impuretés. Pour les indications relatives au nettoyage de la surface du pénétrateur, voir également l'Annexe D de l'ISO 14577-1.

La rugosité de surface du pénétrateur a un effet similaire sur l'incertitude de mesure que la rugosité de l'éprouvette. Il convient de tenir compte de la finition de surface du pénétrateur pour les essais dans la nano-intervalle.

4.5.2.2 L'angle au sommet entre les faces opposées de la pyramide en diamant doit être $136^\circ \pm 0,3^\circ$ (voir Figure 2) ($\alpha = 68,0^\circ \pm 0,2^\circ$).

L'angle doit être mesuré dans l'intervalle entre h_1 et h_2 (voir Tableau 3 et Figure 1). La géométrie et la finition du pénétrateur doivent être contrôlées sur tout l'intervalle de profondeur de pénétration étalonné, c'est-à-dire de la pointe du pénétrateur, h_0 , jusqu'à la profondeur de pénétration maximale étalonnée, h_2 .

4.5.2.3 L'angle entre l'axe de la pyramide en diamant et l'axe du porte-pénétrateur (perpendiculairement à la face d'appui) ne doit pas dépasser $0,5^\circ$.

4.5.2.4 Les quatre faces doivent se rencontrer en un point. La longueur maximale admissible de la ligne de jonction entre faces opposées est donnée dans le Tableau 4 (voir également la Figure 3).

4.5.2.5 Le rayon de la pointe du pénétrateur ne doit pas dépasser $0,5 \mu\text{m}$ pour la micro-intervalle (voir Figure 4).

4.2.2.6 La vérification de la forme du pénétrateur doit être effectuée à l'aide de microscopes ou d'autres dispositifs appropriés.

Si le pénétrateur est utilisé pour des essais dans les micro ou nano-intervalles, il convient de réaliser une vérification à l'aide d'un microscope à force atomique (AFM) avec contrôle en boucle fermée. Pour la nano-intervalle, ce mesurage est fortement recommandé.