
Code d'essai des machines-outils —

Partie 1:

**Exactitude géométrique des machines
fonctionnant à vide ou dans des
conditions quasi-statiques**

iTeh STANDARD PREVIEW

Test code for machine tools —

*Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or
quasi-static conditions*

ISO 230-1:2012

<https://standards.itih.ai/catalog/standards/sist/a9a215da-f176-4e13-a50e-eac855780845/iso-230-1-2012>



iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 230-1:2012

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9a215da-f176-4e13-a50e-eac855780845/iso-230-1-2012>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2012

Droits 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 l'accord écrit de l'ISO à l'adresse ci-après ou du comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20
Tel. + 41 22 749 01 11
Fax + 41 22 749 09 47
E-mail copyright@iso.org
Web www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos	v
Introduction.....	vii
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	2
3.1 Généralités	2
3.2 Termes pour le système de coordonnées machine et nomenclature des mouvements	2
3.3 Termes relatifs à la conformité statique et à l'hystérésis	3
3.4 Termes relatifs aux axes de mouvement linéaire	4
3.5 Définitions relatives aux axes de rotation	12
3.6 Termes relatifs à l'erreur de parallélisme et de perpendicularité des axes de déplacement	19
3.7 Termes pour d'autres relations entre lignes moyennes d'axes	25
3.8 Termes pour les mouvements multiaxiaux (essais cinématiques).....	26
3.9 Termes relatifs à l'exactitude géométrique des surfaces fonctionnelles de la machine, composants de la machine-outil et éprouvettes.....	30
4 Tolérances.....	34
4.1 Généralités	34
4.2 Tolérances applicables aux surfaces fonctionnelles de machine-outil, composants de machine-outil et éprouvettes	40
4.3 Conditions de limitation complémentaires associées aux tolérances	40
5 Incertitude de mesure, méthodes d'essai et instruments de mesure.....	41
6 Opérations préliminaires	43
6.1 Installation de la machine avant essais	43
6.2 État de la machine avant essais	43
6.3 Instruments et montage d'essai.....	44
7 Essais d'hystérésis et de souplesse statique des machines	45
7.1 Généralités	45
7.2 Essais d'hystérésis et de conformité statique des machines, effectués en appliquant une force à l'extérieur.....	46
7.3 Essais d'hystérésis et de conformité statique des machines, effectués en appliquant une force à l'intérieur.....	48
7.4 Essais supplémentaires pour les machines avec axes en rotation.....	51
8 Essais d'exactitude géométrique des axes de mouvement linéaire	52
8.1 Généralités	52
8.2 Essais d'erreur de rectitude de mouvement.....	53
8.3 Essais d'erreur de positionnement linéaire d'un mouvement	59
8.4 Essais d'erreur angulaire de mouvement	61
9 Essais d'exactitude géométrique des axes de rotation.....	65
9.1 Référence à l'ISO 230-7	65
9.2 Erreur de positionnement angulaire d'un mouvement.....	66
10 Alignement des axes de mouvement (parallélisme, perpendicularité, coaxialité et intersection)	69
10.1 Parallélisme des axes de mouvement.....	69
10.2 Erreur de coaxialité de lignes moyennes d'axes	76
10.3 Erreur de perpendicularité d'axes de mouvement.....	79
10.4 Intersection de lignes moyennes d'axe	86

11	Essais de mouvement multiaxiaux (cinématiques).....	87
11.1	Généralités	87
11.2	Trajectoires linéaires	88
11.3	Trajectoires circulaires	89
11.4	Mouvement (de forme) conique	96
11.5	Essai d'interpolation sphérique à l'aide d'un témoin sphérique et de capteurs de déplacement linéaire	97
11.6	Erreur de planéité d'une surface générée par deux axes en mouvement linéaire.....	98
11.7	Essais spéciaux	99
12	Essais d'exactitude géométrique des surfaces fonctionnelles de la machine (rectitude, planéité, perpendicularité, parallélisme)	102
12.1	Erreur de rectitude des surfaces fonctionnelles de la machine	102
12.2	Planéité des tables des machines.....	112
12.3	Positionnement et orientation des surfaces fonctionnelles	121
12.4	Erreur de perpendicularité entre lignes et plans.....	131
12.5	Battement de rotation d'organes rotatifs	135
Annexe A (informative) Référentiel de coordonnées de la machine-outil et erreurs de position et d'orientation		137
Annexe B (informative) Mesure de pièce d'essai		150
Annexe C (informative) Références croisées		153
Bibliographie		161
Index Index alphabétique des termes et définitions		162

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO 230-1:2012](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9a215da-fl76-4e13-a50e-eac855780845/iso-230-1-2012)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9a215da-fl76-4e13-a50e-eac855780845/iso-230-1-2012>

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 Normes internationales sont rédigées conformément aux règles données dans les Directives ISO/CEI, Partie 2.

La tâche principale des comités techniques est d'élaborer les Normes internationales. Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

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.

L'ISO 230-1 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 39, *Machines-outils*, sous-comité SC 2, *Conditions de réception des machines travaillant par enlèvement de métal*.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition (ISO 230-1:1996), qui a fait l'objet d'une révision technique.

L'ISO 230 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Code d'essai des machines-outils*:

- *Partie 1: Exactitude géométrique des machines fonctionnant à vide ou dans des conditions quasi-statiques*
- *Partie 2: Détermination de l'exactitude et de la répétabilité de positionnement des axes en commande numérique*
- *Partie 3: Évaluation des effets thermiques*
- *Partie 4: Essais de circularité des machines-outils à commande numérique*
- *Partie 5: Détermination de l'émission sonore*
- *Partie 6: Détermination de la précision de positionnement sur les diagonales principales et de face (Essais de déplacement en diagonale)*
- *Partie 7: Exactitude géométrique des axes de rotation*
- *Partie 8: Vibrations [Rapport technique]*
- *Partie 9: Estimation de l'incertitude de mesure pour les essais des machines-outils selon la série ISO 230, équations de base [Rapport technique]*
- *Partie 10: Détermination des performances de mesure des systèmes de palpation des machines-outils à commande numérique*

La partie suivante est en cours d'élaboration:

- *Partie 11: Instruments de mesure et leurs applications aux essais de géométrie des machines-outils*
[Rapport technique].

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 230-1:2012

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9a215da-f176-4e13-a50e-eac855780845/iso-230-1-2012>

Introduction

L'ISO/TC 39/SC 2 a décidé de réviser et de restructurer la présente partie de l'ISO 230 pour les raisons suivantes:

- a) certains paragraphes de l'édition précédente coïncidaient avec d'autres codes d'essai nouvellement spécifiés;
- b) pour des raisons pratiques, il a été nécessaire de modifier les définitions d'erreur de parallélisme et d'erreur de perpendicularité pour ne pas inclure les erreurs de rectitude dans l'observation du mouvement de la machine-outil;

NOTE Ces définitions ne sont pas censées être utilisées pour la description des erreurs de parallélisme et de perpendicularité des composants et des fonctionnalités. En ce qui concerne les composants et les fonctionnalités, la présente partie de l'ISO 230 respecte directement les définitions des erreurs de parallélisme et de perpendicularité tirées d'autres Normes internationales (par exemple l'ISO 1101).

- c) une distinction claire était souhaitée entre les erreurs pour une trajectoire et les imperfections des surfaces fonctionnelles et les pièces usinées;
- d) il s'est également avéré nécessaire d'aborder les progrès des technologies des machines-outils, des méthodes et instruments de mesure;
- e) l'Annexe A de la deuxième édition a été complétée, car de nouvelles méthodes et de nouveaux appareils de mesure ont été développés et adoptés pour accélérer les mesurages et en améliorer l'exactitude. Par conséquent, cela a été séparé du corps de la norme par le biais d'une future Partie 11 (Rapport technique); <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9a215da-f176-4e13-a50e-eac855780845/iso-230-1-2012>
- f) en outre, afin d'aligner la présente partie de l'ISO 230 avec l'ISO 14253 (toutes les parties), des paragraphes relatifs à l'incertitude de mesure ont été introduits.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 230-1:2012

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9a215da-f176-4e13-a50e-eac855780845/iso-230-1-2012>

Code d'essai des machines-outils —

Partie 1:

Exactitude géométrique des machines fonctionnant à vide ou dans des conditions quasi-statiques

1 Domaine d'application

La présente partie de l'ISO 230 spécifie des méthodes d'essai de l'exactitude géométrique des machines-outils fonctionnant à vide ou dans des conditions quasi-statiques, à l'aide d'essais géométriques et d'usinage. Les méthodes peuvent également être appliquées à d'autres types de machines industrielles.

La présente partie de l'ISO 230 couvre les machines à entraînement mécanique qui peuvent être utilisées pour l'usinage du métal, du bois, etc. par enlèvement de copeaux ou par déformation plastique. Elle ne couvre pas les machines portatives motorisées.

La présente partie de l'ISO 230 concerne uniquement les essais d'exactitude géométrique. Elle ne traite ni des essais de fonctionnement de la machine-outil (vibrations, brochage des composants, etc.), ni de la vérification des caractéristiques (vitesses, avances).

La présente partie de l'ISO 230 ne couvre pas l'exactitude géométrique des mouvements des machines-outils à grande vitesse pour lesquelles les forces d'usinage sont notoirement plus faibles que les forces dues aux accélérations.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application de la présente norme. 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 1, *Spécification géométrique des produits (GPS) — Température normale de référence pour la spécification géométrique des produits et vérification*

ISO 230-2, *Code d'essai des machines-outils — Partie 2: Détermination de l'exactitude et de la répétabilité de positionnement des axes en commande numérique*

ISO 230-4, *Code d'essai des machines-outils — Partie 4: Essais de circularité des machines-outils à commande numérique*

ISO 230-6, *Code d'essai des machines-outils — Partie 6: Détermination de la précision de positionnement sur les diagonales principales et de face (Essais de déplacement en diagonale)*

ISO 230-7, *Code d'essai des machines-outils — Partie 7: Exactitude géométrique des axes de rotation*

ISO/TR 230-8, *Code d'essai des machines-outils — Partie 8: Vibrations*

ISO 841, *Systèmes d'automatisation industrielle et intégration — Commande numérique des machines — Système de coordonnées et nomenclature du mouvement*

ISO 1101, *Spécification géométrique des produits (GPS) — Tolérancement géométrique — Tolérancement de forme, orientation, position et battement*

ISO 12181-1:2011, *Spécification géométrique des produits (GPS) — Circularité — Partie 1: Vocabulaire et paramètres de circularité*

ISO 12780-1:2011, *Spécification géométrique des produits (GPS) — Rectitude — Partie 1: Vocabulaire et paramètres de rectitude*

ISO 12781-1:2011, *Spécification géométrique des produits (GPS) — Planéité — Partie 1: Vocabulaire et paramètres de planéité*

ISO 14253-1, *Spécification géométrique des produits (GPS) — Vérification par la mesure des pièces et des équipements de mesure — Partie 1: Règles de décision pour prouver la conformité ou la non-conformité à la spécification*

3 Termes et définitions

3.1 Généralités

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO 230-2, l'ISO 230-4, l'ISO 230-7, l'ISO 841, l'ISO 12181-1, l'ISO 12780-1 et l'ISO 12781-1 ainsi que les suivants s'appliquent.

La présente partie de l'ISO 230 utilise des définitions métrologiques qui prennent en considération les mouvements concrets, les lignes et surfaces réelles accessibles au mesurage en ne tenant compte ni des réalités de la construction, ni des possibilités de vérification géométrique.

NOTE 1 Dans certains cas, des définitions géométriques (par exemple les définitions de battement, entre autres) ont été retenues dans la présente partie de l'ISO 230 afin d'éliminer toute confusion et de clarifier les formulations utilisées. Cependant, la description des méthodes d'essai, instruments de mesure et tolérances se fonde sur des définitions métrologiques.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9a215da-f176-4e13-a50e-eac855780845/iso-230-1-2012>

NOTE 2 Voir l'index alphabétique pour une liste des termes et définitions.

3.2 Termes pour le système de coordonnées machine et nomenclature des mouvements

3.2.1

système de coordonnées de la machine

système orthogonal main droite avec les trois principaux axes appelés X, Y et Z, et des axes de rotation autour de ces axes marqués A, B et C, respectivement

Voir Figure 1.

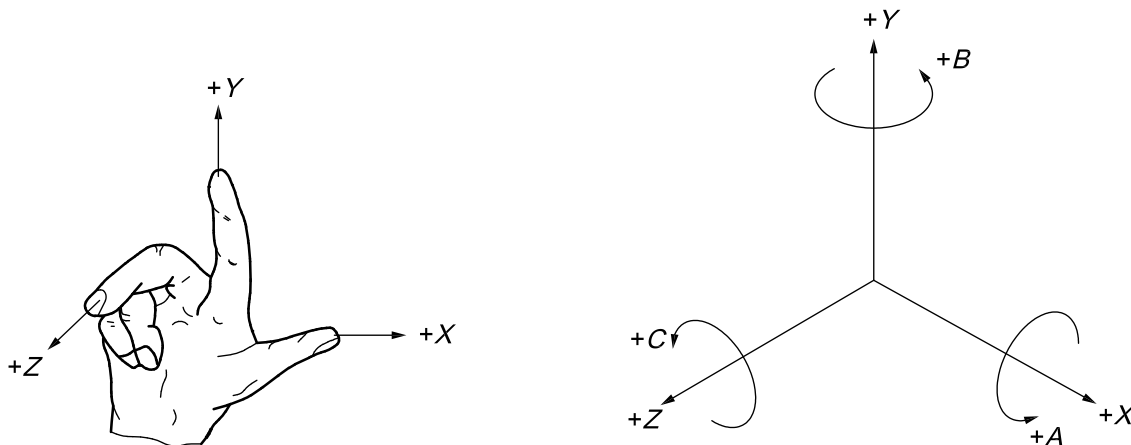


Figure 1 — Système de coordonnées machine orthogonal main droite

3.3 Termes relatifs à la conformité statique et à l'hystérésis

3.3.1

boucle structurelle

assemblage de composants qui maintient la position relative entre deux objets spécifiés

[ISO 230-7:2006, définition 3.1.13]

NOTE Une paire typique d'objets spécifiés est un outil de coupe et une pièce à usiner. Dans ce cas, la boucle structurelle comprend la broche, les paliers et le logement de la broche, la poupée fixe de la machine, les glissières et le châssis de la machine ainsi que les dispositifs de serrage de l'outil et de la pièce. Dans le cas des machines de grandes dimensions, la fondation peut également faire partie de la boucle structurelle.

3.3.2

souplesse statique

déplacement linéaire (ou angulaire) par unité de force (ou de mouvement) statique entre deux objets, spécifié par rapport à la boucle structurelle, à l'emplacement aux directions des forces appliquées, ainsi que par rapport à l'emplacement et à la direction du déplacement considéré

NOTE 1 La souplesse statique est l'inverse de la rigidité statique. La souplesse statique est recommandée en raison de ses propriétés additives.

NOTE 2 L'expression «souplesse croisée» est utilisée lorsque le déplacement et la force ne sont pas mesurés dans la même direction.

3.3.3

jeu

condition de rigidité nulle sur une étendue de déplacement limitée due au jeu entre les éléments de la boucle structurelle

[ISO 230-7:2006, définition 3.1.21]

[ISO 230-1:2012](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9a215da-f176-4e13-a50e-eac855780845/iso-230-1-2012)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a9a215da-f176-4e13-a50e-eac855780845/iso-230-1-2012>

3.3.4

hystérésis

déplacement linéaire (ou angulaire) entre deux objets résultant de l'application et du retrait séquentiels des forces égales (ou moments) dans des directions opposées

[ISO 230-7:2006, définition 3.1.22]

3.3.5

hystérésis de montage

hystérésis de différents composants dans un montage d'essai, normalement due à des jeux mécaniques

[ISO 230-7:2006, définition 3.1.22.1]

3.3.6

hystérésis de machine

hystérésis de la structure de la machine lorsqu'elle est soumise à des charges spécifiques

[ISO 230-7:2006, définition 3.1.22.2]

3.4 Termes relatifs aux axes de mouvement linéaire

3.4.1 Généralités

De nombreux essais et définitions de la présente partie de l'ISO 230 traitent des erreurs de mouvement relatif entre l'organe de la machine qui porte l'outil de coupe et celui qui porte la pièce à usiner. Ces erreurs sont définies et mesurées à la position ou à la trajectoire du point fonctionnel.

3.4.2

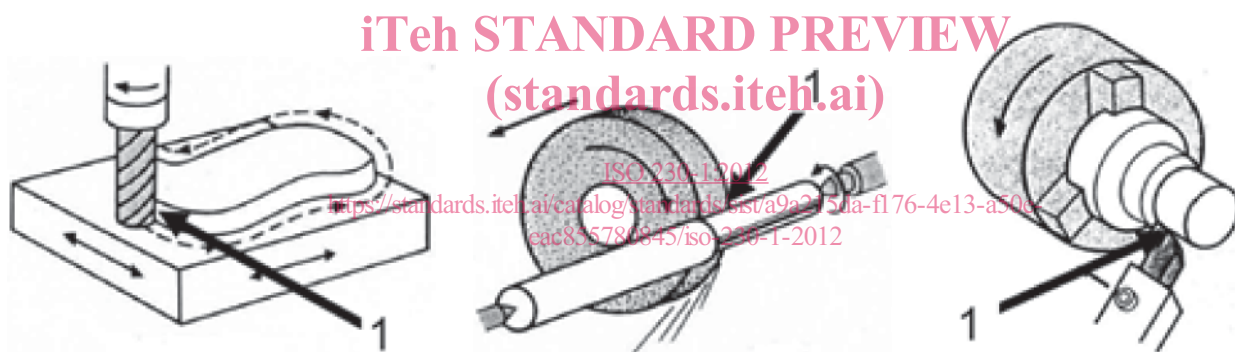
point fonctionnel

point central de l'outil de coupe ou point associé à un organe de la machine-outil où l'outil de coupe serait en contact avec la pièce en vue du retrait de matières

Voir Figure 2.

NOTE 1 Le point fonctionnel est un point unique qui peut se déplacer dans le volume de travail de la machine-outil. La présente partie de l'ISO 230 et les normes spécifiques relatives aux machines-outils recommandent typiquement de réaliser des essais des caractéristiques géométriques en appliquant des réglages d'essai qui sont représentatifs de la position relative de l'outil (se déplaçant) de la longueur moyenne prévue et le centre hypothétique de la pièce à usiner (en déplacement), étant convenu qu'elle est située près du centre de mouvement des axes de la machine-outil.

NOTE 2 Pour améliorer la lisibilité, les définitions et les essais de la présente partie de l'ISO 230 emploient l'expression «point fonctionnel sur un composant mobile» au lieu de l'expression formellement plus précise «point mobile représentant la position relative entre l'outil (en déplacement) et la pièce usinée (en déplacement)».



Légende

1 point fonctionnel

Figure 2 — Exemples de points fonctionnels

3.4.3

erreur de mouvements d'un axe linéaire

mouvements linéaires et angulaires non désirés d'un composant commandé pour se déplacer le long d'une trajectoire (nominale) en ligne droite

Voir Figure 3.

NOTE 1 Les erreurs de mouvements sont identifiées par la lettre *E* suivie d'un indice, où la première lettre est le nom de l'axe correspondant à la direction de l'erreur du mouvement et la deuxième lettre est le nom de l'axe du mouvement (voir Figure 3 ainsi que l'Annexe A).

NOTE 2 Les erreurs de mouvement linéaire sont définies en 3.4.4; les erreurs de mouvements angulaires sont définies en 3.4.16.

3.4.4

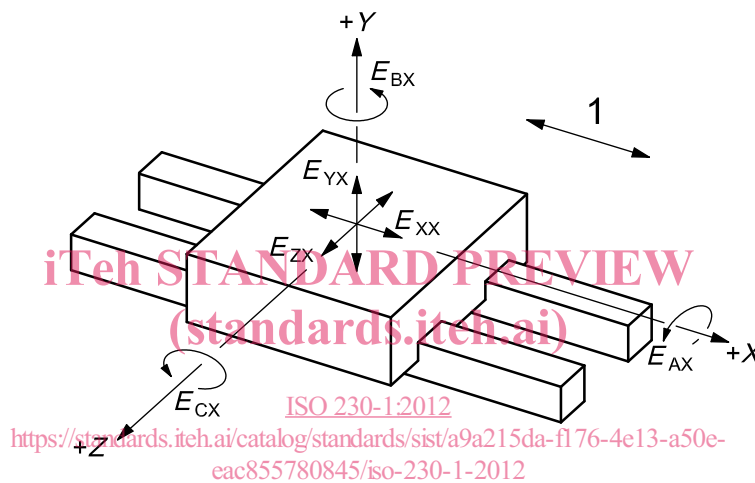
erreur de mouvements linéaires d'un axe linéaire

trois erreurs de translation de mouvement du point fonctionnel d'un composant mobile commandé le long de la trajectoire (nominale) en ligne droite, le premier étant le long de la direction du mouvement (nominal) et les deux autres étant le long de deux directions orthogonales à cette direction

NOTE 1 L'erreur de mouvement linéaire le long de la direction du mouvement s'appelle **erreur de positionnement linéaire du mouvement** (3.4.5). Les deux autres mouvements de translation des erreurs s'appellent **erreurs de rectitude de mouvement** (3.4.8).

NOTE 2 Les erreurs de mouvements linéaires mesurées au point fonctionnel incluent les effets des erreurs de mouvements angulaires. Les effets de ces erreurs de mouvements angulaires sont différents quand la position du point de mesure sur le composant mobile est différente de celle du point fonctionnel. Dans ces cas-ci, les écarts de mouvements angulaires doivent être connus et pris en considération pour déterminer les déviations de la trajectoire du point fonctionnel.

NOTE 3 Si le composant mobile ne peut pas être considéré comme un corps rigide, par exemple en cas de grande table mobile, les essais seront effectués sur plus d'un point sur le composant mobile.



Légende

1 mouvement linéaire commandé sur l'axe X

E_{AX} erreur de mouvement angulaire autour de l'axe de rotation A (roulis)

E_{BX} erreur de mouvement angulaire autour de l'axe de rotation B (lacet)

E_{CX} erreur de mouvement angulaire autour de l'axe de rotation C (tangage)

E_{XX} erreur de positionnement de mouvement linéaire de l'axe X; écart de positionnement de l'axe X

E_{YX} erreur de rectitude de mouvement en direction de l'axe Y

E_{ZX} erreur de rectitude de mouvement en direction de l'axe Z

Figure 3 — Erreurs des mouvements angulaires et linéaires d'un composant commandé pour se déplacer le long d'une trajectoire (nominale) en ligne droite parallèle à l'axe X

3.4.5

erreur de positionnement linéaire du mouvement

mouvement non désiré le long de la direction du mouvement qui résulte en une position locale réelle atteinte par le composant mobile au point fonctionnel différent de la position commandée locale le long de la direction du mouvement

Voir Figure 4.

NOTE 1 Le signe positif de l'erreur de positionnement se situe dans la direction positive du mouvement (selon l'ISO 841).

NOTE 2 L'erreur de positionnement linéaire de mouvement est associée aux imperfections du composant mobile et de son système de guidage. Il n'est pas associé à la réponse dynamique du composant mobile et de son système de positionnement à servocommande.

3.4.6

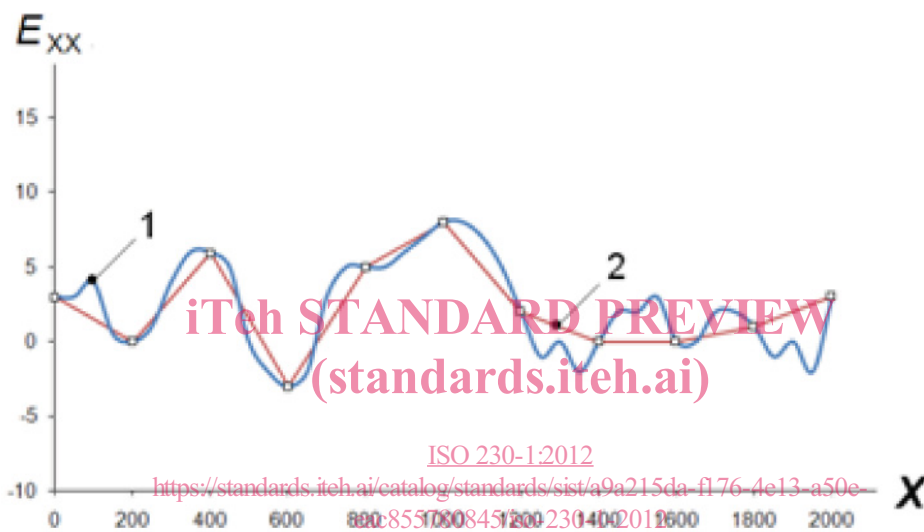
écart de positionnement linéaire

position atteinte par le point fonctionnel sur le composant mobile moins la position cible

NOTE 1 Adapté de l'ISO 230-2:2006, définition 2.5.

NOTE 2 Les écarts de positionnement sont mesurés à des intervalles discrets spécifiés conformément aux exigences de l'ISO 230-2 pour déterminer l'exactitude de positionnement et la répétabilité des axes numériquement contrôlés.

NOTE 3 Les écarts de positionnement mesurés en conformité avec les exigences de l'ISO 230-2 constituent une représentation limitée de l'erreur de positionnement de mouvement (voir Figure 4).



Légende

- X coordonnées sur l'axe X, en mm
- E_{XX} écart de positionnement d'axe et erreur de positionnement de mouvement selon l'axe X, en μm
- 1 erreur de positionnement réelle de mouvement de l'axe X
- 2 écart de positionnement de l'axe X mesuré

Figure 4 — Exemple d'erreur de positionnement linéaire de mouvement et d'écart de positionnement linéaire mesuré du mouvement linéaire d'un point fonctionnel le long de l'axe X

3.4.7

erreur de positionnement linéaire exactitude de positionnement linéaire

valeur du plus grand écart de positionnement linéaire positif ajouté à la plus grande valeur absolue de l'écart négatif de positionnement, évalué en conformité avec des conventions spécifiées

NOTE 1 La présente définition s'applique seulement aux axes qui ne sont pas commandés numériquement de façon continue. L'exactitude d'un positionnement linéaire des axes commandés numériquement en continu est établie et déterminée en conformité avec les exigences de l'ISO 230-2.

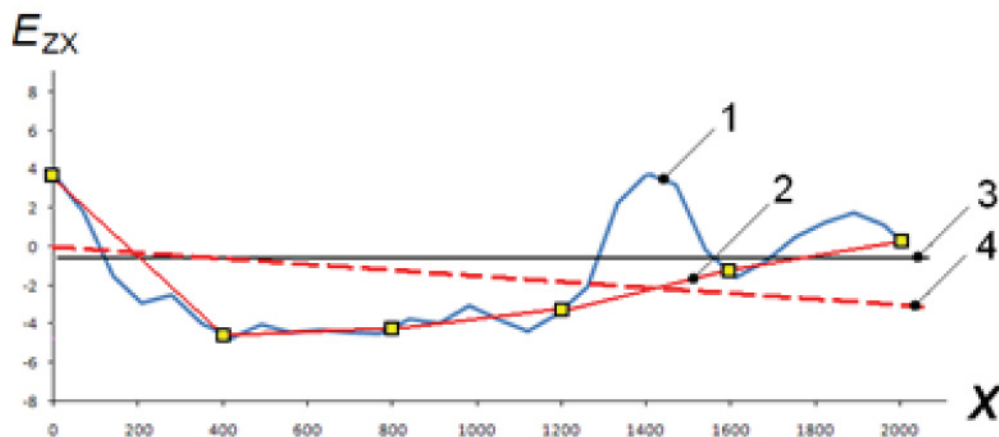
NOTE 2 Une convention pour l'évaluation de positionnement linéaire d'erreur peut être de positionner un axe linéaire manuellement plus de 100 mm, 10 fois vers l'avant, 10 fois vers l'arrière et d'évaluer pour chaque positionnement l'écart de positionnement linéaire.

3.4.8

erreur de rectitude de mouvement

mouvement involontaire dans l'une des deux directions orthogonales à la direction de l'axe linéaire commandé pour se déplacer le long d'un axe (nominal) de trajectoire en ligne droite

Voir Figures 5 et 6.

**Légende**

X coordonnées sur l'axe X, en mm

E_{ZX} écart de rectitude de X en direction de l'axe Z, en μm

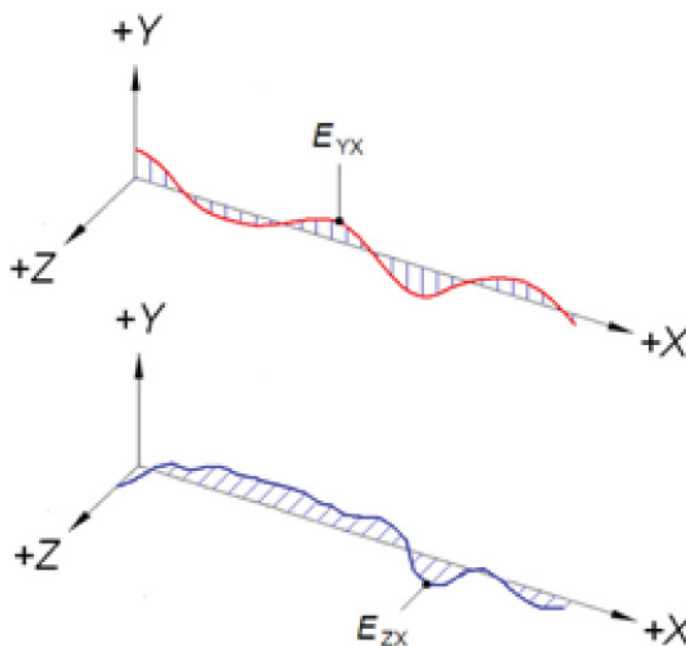
1 erreur de mouvement linéaire de X en direction de l'axe Z

2 erreur de rectitude de mouvement mesurée

3 ligne droite minimale moyenne de zone de référence associée à l'erreur de mouvement linéaire réelle

4 ligne droite minimale moyenne de zone de référence associée à l'erreur de rectitude mesurée

Figure 5 — Exemple d'erreur de rectitude de mouvement en direction de Z et d'erreur de rectitude de mouvement mesurée de la trajectoire du point fonctionnel pour le mouvement selon X

**Légende**

E_{YX} écarts de rectitude X en direction de l'axe Y

E_{ZX} écarts de rectitude X en direction de l'axe Z

Figure 6 — Représentation des écarts de rectitude d'axe des X dans les directions Y et Z