

---

---

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

*Test code for machine tools —*

*Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools*

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

ISO 230-4:2022

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/3adcc611-206d-47fe-be96-02632f489f85/iso-230-4-2022>



iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

ISO 230-4:2022

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/3adcc611-206d-47fe-be96-02632f489f85/iso-230-4-2022>



**DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT**

© ISO 2022

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, 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, ou la diffusion sur l'internet ou sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office  
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8  
CH-1214 Vernier, Genève  
Tél.: +41 22 749 01 11  
E-mail: [copyright@iso.org](mailto:copyright@iso.org)  
Web: [www.iso.org](http://www.iso.org)

Publié en Suisse

## Sommaire

Page

Avant-propos .....	iv
<b>1</b> <b>Domaine d'application</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b> <b>Références normatives</b> .....	<b>1</b>
<b>3</b> <b>Termes et définitions</b> .....	<b>1</b>
<b>4</b> <b>Conditions d'essai</b> .....	<b>6</b>
4.1    Environnement d'essai .....	6
4.2    Machine à soumettre à l'essai .....	6
4.3    Mise en température de la machine .....	6
4.4    Paramètres d'essai .....	7
4.5    Étalonnage de l'instrument de mesure .....	7
4.6    Incertitude de mesure .....	7
<b>5</b> <b>Mode opératoire d'essai</b> .....	<b>8</b>
<b>6</b> <b>Présentation des résultats</b> .....	<b>8</b>
<b>7</b> <b>Éléments à convenir entre le fournisseur ou fabricant et l'utilisateur</b> .....	<b>9</b>
<b>Annexe A</b> (informative) <b>Différences entre les erreurs de circularité <math>G</math> et <math>G(b)</math> et les erreurs radiales <math>F</math> et <math>D</math></b> .....	<b>13</b>
<b>Annexe B</b> (informative) <b>Influences des erreurs types de la machine sur les trajectoires circulaires réalisées sur deux axes linéaires</b> .....	<b>14</b>
<b>Annexe C</b> (informative) <b>Précautions à prendre lors des montages d'essais pour les essais de circularité avec des axes rotatifs</b> .....	<b>20</b>
<b>Annexe D</b> (informative) <b>Ajustement du diamètre et de la vitesse de suivi de contour pour des essais de circularités</b> .....	<b>26</b>
<b>Annexe E</b> (informative) <b>Essais de circularité utilisant le signal de retour</b> .....	<b>27</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>28</b>

## 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](http://www.iso.org/directives)).

L'attention est attirée 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](http://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 [www.iso.org/avant-propos](http://www.iso.org/avant-propos).

Le présent document a été élaboré 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 230-4:2005), qui a fait l'objet d'une révision technique.

Les principales modifications sont les suivantes:

- introduction d'essais de circularité avec des axes de rotation;
- application des définitions de l'ISO 230-1;
- inclusion des précautions à prendre lors du mesurage des axes de rotation dans l'[Annexe C](#).

Une liste de toutes les parties de la série ISO 230 se trouve sur le site web de l'ISO.

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse [www.iso.org/fr/members.html](http://www.iso.org/fr/members.html).

# Code d'essai des machines-outils —

## Partie 4: Essais de circularité des machines-outils à commande numérique

### 1 Domaine d'application

Le présent document fournit des méthodes pour la détermination des performances en contournage des machines-outils à commande numérique.

Le présent document spécifie les méthodes d'essai et d'évaluation de l'erreur de circularité bidirectionnelle, de l'erreur radiale moyenne bidirectionnelle, de l'erreur de circularité et de l'erreur radiale des trajectoires circulaires effectuées grâce aux mouvements simultanés de deux axes linéaires.

Le présent document spécifie aussi les méthodes de vérification des écarts des trajectoires circulaires ou à rayon constant produits par n'importe quelle combinaison des axes linéaires et des axes de rotation contrôlés (coordonnés) simultanément. Le principe de base de ces essais est de coordonner les axes multiples de mouvement (la combinaison d'axes de rotation et d'axes linéaires) pour conserver la position relative entre l'outil et la pièce constante.

Le présent document décrit les différences entre les erreurs de circularité et les erreurs radiales ([Annexe A](#)), les influences d'erreurs type de la machine sur les trajectoires circulaires réalisées sur deux axes linéaires ([Annexe B](#)), les précautions à prendre lors des montages d'essais pour les essais de circularité avec des axes de rotation ([Annexe C](#)), un exemple d'ajustement du diamètre et de la vitesse du suivi de contour pour les essais de circularité ([Annexe D](#)), et les essais de circularité utilisant le signal de retour ([Annexe E](#)).

### 2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils 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 230-1:2012, *Code d'essai des machines-outils — Partie 1: Exactitude géométrique des machines fonctionnant à vide ou dans des conditions quasi-statiques*

### 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et les définitions de l'ISO 230-1 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:

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

**3.1**  
**trajectoire nominale**

<mouvement d'interpolation circulaire> trajectoire circulaire programmée de la commande numérique, définie par son diamètre (ou son rayon), la position de son centre et son orientation dans la zone de travail de la machine-outil, et qui peut être soit un cercle complet, soit une portion de cercle d'au moins 90°

Note 1 à l'article: Interpolation linéaire (G01) ou interpolation circulaire (G02 ou G03) ou d'autres types d'interpolation peuvent être utilisés pour générer une trajectoire nominale circulaire.

**3.2**  
**trajectoire réelle**

trajectoire produite par la machine-outil programmée pour se déplacer sur la *trajectoire nominale* (3.1)

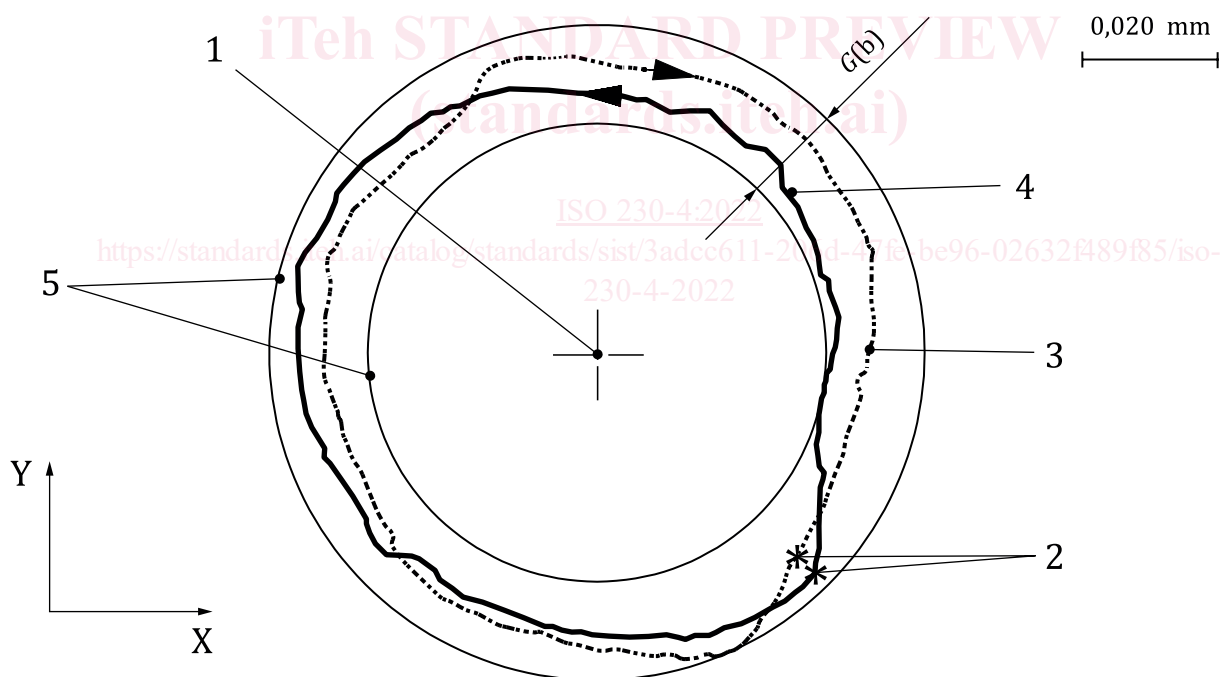
**3.3**  
**erreur de circularité bidirectionnelle**

écart de circularité bidirectionnel

$G(b)$

écart radial minimal de deux cercles concentriques (cercles de la zone minimale), enveloppant deux *trajectoires réelles* (3.2), l'une étant réalisée en contournage dans le sens des aiguilles d'une montre et l'autre en contournage dans le sens inverse des aiguilles d'une montre

Note 1 à l'article: Voir [Figure 1](#), où l'erreur de circularité bidirectionnelle  $G(b)_{XY} = 0,015$  mm. Les indices identifient les axes déplacés pendant l'essai circulaire (voir [3.7](#)).



**Légende**

- 1 centre du cercle des moindres carrés, appliqué aux deux trajectoires réelles conformément à la Note 2 à l'article
- 2 points de départ
- 3 trajectoire réelle, dans le sens des aiguilles d'une montre
- 4 trajectoire réelle, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre
- 5 cercles concentriques enveloppant les trajectoires réelles

**Figure 1 — Évaluation de l'erreur de circularité bidirectionnelle  $G(b)$  en utilisant le cercle des moindres carrés**

Note 2 à l'article: L'erreur de circularité bidirectionnelle  $G(b)$  peut être évaluée comme l'étendue radiale maximale des écarts autour du cercle des moindres carrés. La méthode des moindres carrés est calculée à partir de deux trajectoires, c'est-à-dire la trajectoire dans le sens des aiguilles d'une montre et celle dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Note 3 à l'article: L'erreur de circularité bidirectionnelle  $G(b)$  ne comprend pas les erreurs de réglage, c'est-à-dire les erreurs de centrage de l'instrument de mesure.

Note 4 à l'article: Le mesurage de l'erreur de circularité bidirectionnelle  $G(b)$  requiert l'utilisation d'un équipement d'essai uniquement dans le cas des mesures d'un déplacement étalonné (aucun mesurage de longueur étalonné n'est nécessaire pour déterminer le diamètre de trajectoire). Les mesurages de l'erreur radiale  $F$  (3.5) et de la valeur de l'erreur radiale moyenne bidirectionnelle  $D$  (3.6) requièrent un équipement d'essai avec étalonnage de la longueur et du déplacement (voir l'Annexe A).

Note 5 à l'article: Une ligne située dans un plan est dite circulaire lorsque tous ses points sont contenus entre deux cercles concentriques dont l'écartement radial ne dépasse pas une valeur donnée (voir Figure 2).

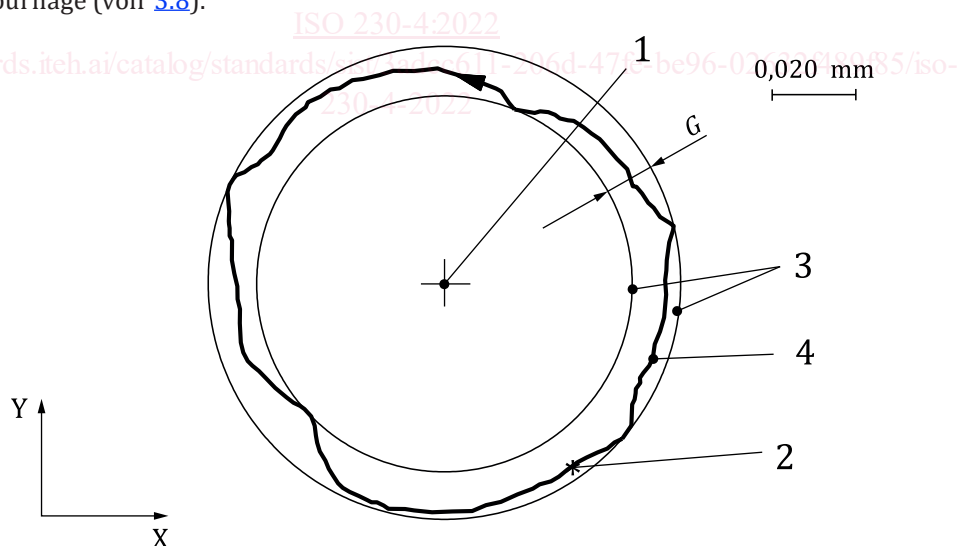
Note 6 à l'article: La désignation  $G(b)$  s'applique pour les mesurages effectués avec un instrument de mesure externe, par exemple tel que décrit dans l'ISO 230-1:2012, 11.3.4, uniquement. Les résultats des essais de circularité utilisant le signal de retour doivent être désignés par «erreur de circularité bidirectionnel utilisant le signal de retour  $G(b)_r$ » (voir l'Annexe E).

### 3.4 erreur de circularité écart de circularité

$G$

écart radial minimal de deux cercles concentriques enveloppant la *trajectoire réelle* (3.2) (cercles de la zone minimale), réalisée en contournage dans le sens des aiguilles d'une montre ou dans le sens inverse des aiguilles d'une montre

Note 1 à l'article: Voir Figure 2, où l'erreur de circularité  $G_{XY} = 0,012$  mm. La séquence d'indices indique la direction du contournage (voir 3.8).



#### Légende

- 1 centre du cercle des moindres carrés, appliqué à la trajectoire réelle conformément à la Note 2 à l'article
- 2 point de départ
- 3 cercles concentriques enveloppant la trajectoire réelle
- 4 trajectoire réelle

**Figure 2 — Évaluation de l'erreur de circularité  $G$  en utilisant le cercle des moindres carrés**

Note 2 à l'article: Note 2 à l'article à Note 6 à l'article pour l'erreur de circularité bidirectionnelle  $G(b)$  (3.3) s'appliquent pour l'erreur de circularité  $G$ . Pour les différences entre l'erreur de circularité  $G$  et l'erreur radiale  $F$  (3.5), voir l'Annexe A, Tableau A.1.

Note 3 à l'article: La désignation  $G$  s'applique pour les mesurages effectués avec un instrument de mesure externe, par exemple tel que décrit dans l'ISO 230-1:2012, 11.3.4. Les résultats des essais de circularité utilisant le signal de retour doivent être désignés par erreur de circularité utilisant le signal de retour  $G_r$ , voir l'Annexe E.

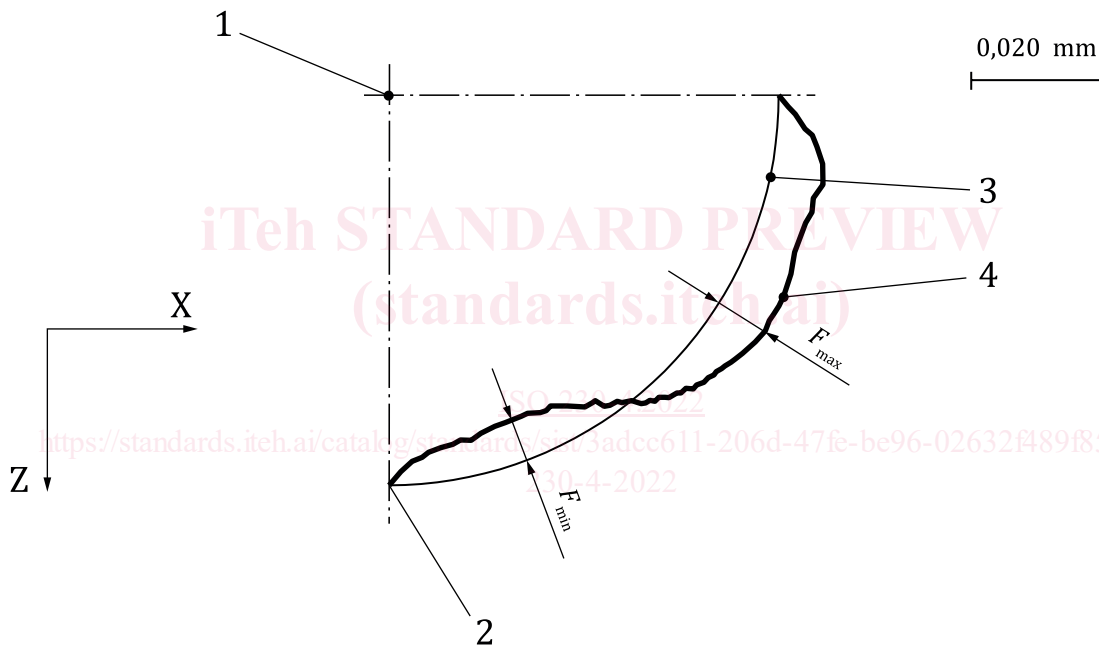
**3.5**  
**erreur radiale**

écart radial

$F$

écart entre la trajectoire réelle (3.2) et la trajectoire nominale (3.1), où le centre de la trajectoire nominale est obtenu soit a) à partir du centrage des instruments de mesure sur la machine-outil, soit b) à partir de l'analyse par l'analyse des moindres carrés du centrage obtenu uniquement pour un cercle complet

Note 1 à l'article: Voir Figure 3, où l'erreur radiale  $F_{ZX, \max} = +0,008$  mm et l'erreur radiale  $F_{ZX, \min} = -0,006$  mm. La séquence d'indices indique la direction du contournage (voir 3.8).



**Légende**

- 1 centre du cercle nominal
- 2 point de départ
- 3 trajectoire nominale
- 4 trajectoire réelle

**Figure 3 — Évaluation de l'erreur radiale  $F$**

Note 2 à l'article: Les écarts positifs sont mesurés en s'éloignant du centre du cercle et les écarts négatifs en se rapprochant vers le centre du cercle (voir Figure 3). L'erreur radiale est donnée par la valeur maximale,  $F_{\max}$ , et par la valeur minimale,  $F_{\min}$ .

Note 3 à l'article: Les erreurs de réglage peuvent être incluses dans l'erreur radiale  $F$ ; cela ne s'applique que lorsque le centre de la trajectoire nominale est obtenu à partir du centrage de l'instrument de mesure sur la machine-outil [option a) de la définition].

Note 4 à l'article: Pour les différences entre l'erreur radiale  $F$  et l'erreur de circularité  $G$  (3.4), voir l'Annexe A, Tableau A.1.



### 3.6

#### erreur radiale moyenne bidirectionnelle

écart radial moyen bidirectionnel

$D$

différence entre le rayon du centre des moindres carrés de deux *trajectoires* circulaires *réelles* complètes (3.2), l'une étant réalisée en contournage dans le sens des aiguilles d'une montre et l'autre en contournage dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, et le rayon de la *trajectoire nominale* (3.1)

Note 1 à l'article: Pour les différences entre l'erreur radiale bidirectionnelle  $D$  et l'erreur de circularité bidirectionnelle  $G(b)$ (3.3), voir l'Annexe A, Tableau A.1.

### 3.7

#### identification des axes

désignation des axes en mouvement pour effectuer la *trajectoire réelle* (3.2)

### 3.8

#### sens du contournage pour les essais de circularité avec des axes linéaires

<contournage dans le sens des aiguilles d'une montre ou sens inverse des aiguilles d'une montre> désigné par la séquence des indices indiquant le sens du contournage

Note 1 à l'article: L'ordre des indices correspond à l'ordre dans lequel l'arc circulaire croise l'extrémité positive de chaque axe. Par exemple,  $G_{XY}$  désigne l'erreur de circularité en sens inverse des aiguilles d'une montre (3.4), parce qu'un arc dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans le plan XY croise l'axe des X+ immédiatement après l'axe des Y+. De manière similaire,  $G_{YX}$  désigne l'erreur de circularité en sens des aiguilles d'une montre (3.4), parce qu'un arc dans le plan XY croise l'axe des Y+ immédiatement après l'axe des X+. Dans le cas d'un résultat bidirectionnel, les indices désignent le sens du premier arc.

### 3.9

#### erreur d'interpolation de contournage

écart d'interpolation de contournage

$E_{int}$

amplitude des écarts de la trajectoire du centre d'outil à partir du point fixe dans le *repère pièce* (3.11), lorsqu'un ou des axes de rotation sont entraînés, de façon synchrone avec un mouvement circulaire interpolé avec des axes linéaires, de sorte à ce que le centre d'outil reste nominale à ce point fixe dans le *repère pièce* (3.11)

Note 1 à l'article: Les méthodes d'essai types sont décrites dans l'ISO 230-1:2012, 11.3.5. Les instruments de mesure types sont décrits dans l'ISO/TR 230-11:2018, 12.2.1, 12.3.3, et 12.3.4.

Note 2 à l'article: Si le dispositif de mesure de longueur (ballbar, capteur de déplacement linéaire ou combiné de trois capteurs de déplacements linéaires) est tourné avec un axe rotatif, les mesures sont effectuées dans le système de coordonnées fixé à l'axe rotatif, c'est-à-dire dans une direction radiale, tangentielle et/ou axiale. Cela est spécifié par  $E_{int,radial}$ ,  $E_{int,tangential}$ , et  $E_{int,axial}$ .

Note 3 à l'article: Si le dispositif de mesure de longueur (ballbar, capteur de déplacement linéaire ou combiné de trois capteurs de déplacements linéaires) n'est pas tourné avec un axe rotatif, les mesures sont effectuées dans des directions X, Y, et Z du *système de coordonnées de la machine* (3.10). Cela est spécifié par  $E_{int,X}$ ,  $E_{int,Y}$ , et  $E_{int,Z}$ .

Note 4 à l'article: Les axes déplacés sont spécifiés en donnant la nomenclature des axes. Par exemple, un mesurage avec des axes linéaires X et Y et un axe de rotation C dans une direction radiale est spécifié par  $E_{int,radial,XYC}$ . Un mesurage avec trois axes linéaires X, Y, Z et deux axes de rotation A, C dans une direction radiale, correspond à un essai sphérique conformément à l'ISO 230-1:2012, 11.5, et est spécifié par  $E_{int,radial,XYZAC}$ .

Note 5 à l'article: Le mouvement dans le sens des aiguilles d'une montre ou dans le sens inverse des aiguilles d'une montre est défini par les axes de rotation s'il n'y a qu'un seul axe rotatif déplacé. Si deux axes de rotation sont déplacés, le sens des aiguilles d'une montre et le sens inverse des aiguilles d'une montre sont définis par l'axe qui se déplace sur une plus grande amplitude, généralement l'axe qui se déplace sur 360°. Le sens des aiguilles d'une montre est spécifié par CW, le sens inverse des aiguilles d'une montre est spécifié par CCW. Pour un mesurage dans le sens des aiguilles d'une montre avec les axes X, Y et C dans une direction radiale la spécification est  $E_{int,radial,XYC(CW)}$ .

Note 6 à l'article: Les précautions à prendre pour les montages d'essai pour les essais circulaires avec axes rotatifs sont indiquées à l'[Annexe C](#).

### 3.10 système de coordonnées de la machine

repère-machine

RM

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

Note 1 à l'article: Le système de coordonnées de la machine est prescrit par l'ISO 841 pour plusieurs machines-outils.

[SOURCE: ISO 230-1:2012, 3.2.1, modifié — figure supprimée et Note 1 à l'article ajoutée.]

### 3.11 repère pièce

RP

système de coordonnées cartésien déterminé sur une pièce

Note 1 à l'article: Lorsqu'une machine-outil a un ou des axes de rotation sur le côté pièce, le repère pièce est tourné avec le ou les axes de rotation.

[SOURCE: ISO 2806:1994, 2.7.3, modifié — Note 1 à l'article ajoutée.]

## 4 Conditions d'essai

### 4.1 Environnement d'essai

Où la température de l'environnement peut être contrôlée, elle doit être réglée à 20 °C ou à une température de référence spécifiée. Si la température de l'environnement est différente de 20 °C ou de la température de référence spécifiée, une correction de la dilatation thermique différentielle nominale (NDE) doit être effectuée entre le système de mesure et l'objet mesuré (machine-outil) pour obtenir des résultats correspondant à une température de 20 °C ou à celle de la température de référence spécifiée (pour les mesurages de l'erreur radiale uniquement).

La machine et, si nécessaire, les instruments de mesure, doivent rester dans l'environnement d'essai suffisamment longtemps pour avoir atteint un état thermiquement stable avant les essais. Ils doivent être protégés des courants d'air et des rayonnements extérieurs, tels que ceux du soleil et des réchauffeurs aériens.

### 4.2 Machine à soumettre à l'essai

La machine doit être complètement assemblée et être en état de marche. Toutes les opérations nécessaires de nivellement et les contrôles fonctionnels doivent avoir été effectués avant la mise en route des essais.

Sauf accord contraire entre le fabricant ou fournisseur et l'utilisateur, les essais de circularité doivent être réalisés avec une machine non chargée, c'est-à-dire sans pièce.

### 4.3 Mise en température de la machine

Les essais doivent être précédés par une opération de mise en température appropriée, précisée par le fabricant de la machine et/ou définie par accord entre le fournisseur ou fabricant et l'utilisateur.

Si aucune autre condition n'est spécifiée, les déplacements préalables doivent être limités à ceux nécessaires au réglage des instruments de mesure.

#### 4.4 Paramètres d'essai

Les paramètres d'essai sont:

- a) le diamètre (ou rayon) de la trajectoire nominale et – pour les essais avec un ou des axes de rotation – décalage(s) radial (radiaux) par rapport à l'axe ou les axes de rotation;
- b) la vitesse de contournage (informations sur le réglage du diamètre et de la vitesse de contournage pour les essais circulaires afin de maintenir constante l'accélération des axes, voir l'[Annexe D](#));
- c) le sens du contournage pour les essais de circularité avec des axes linéaires, et avec des axes de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre ou dans le sens inverse des aiguilles d'une montre conformément à [3.8](#) et [3.9](#);
- d) l'identification des axes, c'est-à-dire des axes de la machine déplacés pour effectuer la trajectoire réelle;
- e) la position de l'instrument de mesure dans la zone de travail de la machine-outil;
- f) la température (température de l'environnement, de l'instrument de mesure, de la machine) et le coefficient de dilatation (de la machine-outil, de l'instrument de mesure) utilisé pour la compensation uniquement pour le mesurage de l'erreur radiale moyenne bidirectionnelle  $D$  et de l'erreur radiale  $F$ ;
- g) la méthode d'acquisition des données (étendue de saisie des données si différente de  $360^\circ$ , points de départ et d'arrêt du mouvement réel, nombre de points de mesurage choisis pour l'acquisition des données numériques et informations relatives au filtrage, selon le cas);
- h) toutes les routines de compensation de la machine utilisées au cours du cycle d'essai;
- i) les positions des chariots ou des éléments en mouvement sur les axes qui ne sont pas soumis à l'essai.

#### 4.5 Étalonnage de l'instrument de mesure

La dimension de référence de l'instrument d'essai (par exemple, la longueur de référence  $L_B$  de la ballbar) doit être connue afin d'effectuer la vérification de l'erreur radiale moyenne bidirectionnelle  $D$  et l'erreur radiale  $F$ .

NOTE Pour les essais de circularité utilisant le signal de retour, voir l'[Annexe E](#).

#### 4.6 Incertitude de mesure

Les principaux éléments contribuant à l'incertitude de mesure pour l'erreur de circularité bidirectionnelle  $G(b)$ , l'erreur de circularité  $G$  et l'erreur d'interpolation de contournage  $E_{\text{int}}$  sont:

- les incertitudes de mesure de l'équipement d'essai;
- la répétabilité du mesurage;
- l'influence de la température sur la machine-outil et/ou de l'équipement d'essai, vérifiée, par exemple par l'essai de variation de température ambiante (ETV) selon l'ISO/TR 16015.

Les principaux éléments contribuant à l'incertitude de mesure pour l'erreur radiale moyenne bidirectionnelle  $D$  et l'erreur radiale  $F$  sont:

- les éléments contribuant pour les erreurs  $G(b)$  et  $G$  (voir la première liste au [4.6](#));
- l'incertitude de mesure de la température de la machine-outil et de l'équipement d'essai (causé par l'incertitude du (des) capteur(s) de température et l'incertitude de l'emplacement du (des) capteurs de température);

- l'incertitude des coefficients de dilatation thermique de la machine-outil et de l'équipement d'essai (utilisé pour la compensation à 20 °C ou pour la température de référence spécifiée).

## 5 Mode opératoire d'essai

Pour déterminer l'erreur de circularité bidirectionnelle  $G(b)$ , l'erreur radiale moyenne bidirectionnelle  $D$ , deux trajectoire réelles doivent être mesurées consécutivement: l'une en contournage dans le sens des aiguilles d'une montre et l'autre en contournage dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Pour déterminer l'erreur de circularité  $G$ , l'erreur radiale  $F$  et l'erreur d'interpolation de contournage  $E_{int}$ , le mesurage doit être une fois pour un contournage dans le sens des aiguilles d'une montre et une fois pour un contournage dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. L'erreur d'interpolation de contournage dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse des aiguilles d'une montre est défini par l'axe rotatif. Si deux axes rotatifs sont déplacés, l'erreur d'interpolation de contournage dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse des aiguilles d'une montre est défini par les axes de rotation avec une plus grande amplitude de mouvement, généralement l'axe rotatif se déplaçant sur 360° (voir 3.9, Note 5 à l'article).

Toutes les données mesurées correspondant à la trajectoire réelle (y compris toutes les crêtes aux points de réversibilité) doivent être utilisées dans l'évaluation.

Il convient de minimiser les erreurs de montage pour l'erreur radiale  $F$  d'une portion de cercle.

Les méthodes de mesurage type pour un essai de circularité avec deux axes linéaires sont un capteur linéaire rotatif unidimensionnel, une pièce de référence circulaire et un capteur de déplacement bidimensionnel, une ballbar télescopique, une échelle numérique bidimensionnelle et deux capteurs de déplacement linéaire et une pièce de référence perpendiculaire (tel que décrit dans l'ISO 230-1:2012, 11.3.4). Les instruments de mesure sont décrits dans l'ISO/TR 230-11:2018, 12.2.1 (ballbar télescopique) et 12.3.1 (échelle numérique bidimensionnelle).

Les méthodes de mesurage type pour les essais de circularité avec un ou des axes de rotation sont des capteurs de déplacement linéaire et une pièce de référence sphérique, trois capteurs de déplacement linéaire et une sphère de référence (essai radial), une ballbar télescopique (tel que décrit dans l'ISO 230-1:2012, 11.3.5 et 11.5). Les instruments de mesure sont décrits dans l'ISO/TR 230-11:2018, 12.2.1 (ballbar télescopique), 12.3.3 (Palpeur 3D pour sphères, type à contact) et 12.3.4 (Tête de palpeur 3D, type sans contact).

Pour les influences des erreurs typiques des machines sur les trajectoires circulaires exécutées avec deux axes linéaires, voir l'Annexe B et les références [7] à [12].

L'Annexe C résume les précautions à prendre lors des montages d'essais pour les essais de circularité avec des axes de rotation.

## 6 Présentation des résultats

Une méthode graphique de présentation des résultats est recommandée avec les données des résultats d'essai suivants, spécifiés numériquement:

- a) pour les essais de circularité avec des axes linéaires
  - 1) erreur de circularité bidirectionnelle  $G(b)$ ;
  - 2) erreur radiale moyenne bidirectionnelle  $D$ , corrigée à 20 °C ou à la température de référence spécifiée;
  - 3) erreurs de circularité  $G$ , pour le contournage dans le sens des aiguilles d'une montre et/ou dans le sens inverse des aiguilles d'une montre;