



Spécification technique

ISO/TS 15530-2

Spécification géométrique des produits (GPS) — Machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) : Technique pour la détermination de l'incertitude de mesure —

Partie 2: Utilisation de plusieurs orientations de la pièce et d'étalons simples étalonnés

*Geometrical product specifications (GPS) — Coordinate
measuring machines (CMM): Technique for determining the
uncertainty of measurement —*

*Part 2: Use of multiple workpiece orientations and calibrated
simple standards*

**Première édition
2026-03**

Sample Document

get full document from standards.iteh.ai



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2026

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
Web: www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos	iv
Introduction	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	1
4 Symboles	2
5 Exigences relatives à l'évaluation de l'incertitude	3
6 Principe de mesurage et d'évaluation de l'incertitude	4
7 Procédure	5
7.1 Mesurages	5
7.1.1 Généralités	5
7.1.2 Mesurages multiples sur la pièce	6
7.1.3 Mesurages des étalons de longueur	8
7.1.4 Mesurages pour l'évaluation de l'erreur de qualification du palpeur	10
7.2 Évaluation de la valeur de mesure	12
7.2.1 Calcul de la valeur de mesure y_{corr} sans correction d'erreur	12
7.2.2 Calcul de la valeur de mesure corrigée de l'erreur de justesse y_{corr}	12
7.3 Évaluation de l'incertitude de mesure	13
8 Considérations spéciales	14
8.1 Mesurage d'écart géométrique	14
8.1.1 Généralités	14
8.1.2 Cas d'informations complètes	15
8.1.3 Cas où les informations sont moindres	16
8.2 Tolérances	16
8.3 Étalonnage	16
8.3.1 Exigences relatives à la traçabilité	16
8.3.2 Éviter les erreurs de justesse inconnues et les autres sous-estimations de l'incertitude	16
8.3.3 Calcul de l'incertitude de mesure étendue	17
Annexe A (normative) Formules	18
Annexe B (informative) Exemples d'utilisation pour l'étalonnage/l'essai	27
Annexe C (informative) Application pour le contrôle du lot durant une vérification de la conformité	44
Annexe D (normative) Calcul du facteur d'élargissement k en utilisant le nombre effectif de degrés de liberté	46
Annexe E (informative) Recommandations relatives aux contributeurs à l'incertitude non détectés	48
Annexe F (informative) Relation avec le modèle de matrice GPS	51
Bibliographie	52

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'ISO attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'ISO ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de propriété revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'ISO n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse www.iso.org/brevets. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié tout ou partie de tels droits de propriété.

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.

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 213, *Spécifications et vérification dimensionnelles et géométriques des produits*.

Une liste de toutes les parties de la série ISO 15530 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.

Introduction

Le présent document est une spécification géométrique des produits (GPS). Elle influence le maillon G des chaînes de normes sur la taille, la distance, la forme, l'orientation, la position et le battement dans la matrice GPS générale (voir l'[Annexe F](#)).

Le modèle de matrice ISO GPS de l'ISO 14638 donne une vue d'ensemble du système ISO GPS, dont le présent document fait partie. Les principes fondamentaux du système ISO GPS, donnés dans l'ISO 8015, s'appliquent au présent document et les règles de décision par défaut, données dans l'ISO 14253-1, s'appliquent aux spécifications faites conformément au présent document, sauf indication contraire.

Pour de plus amples informations sur la relation du présent document avec le modèle de matrice GPS, voir l'[Annexe F](#).

Les systèmes de mesure tridimensionnels (SMT) sont devenus essentiels pour la vérification des données géométriques dans l'industrie. Selon la série de normes ISO 9000, dans un système de management de la qualité, il est requis d'étalonner l'équipement de mesure approprié par rapport à un équipement certifié ayant une relation connue et valable avec les étalons reconnus au niveau national ou international afin d'établir la traçabilité. Conformément le Guide ISO/IEC 99, *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie* (VIM), un étalonnage comprend, hormis l'établissement de la relation entre les valeurs mesurées et les valeurs correctes d'une grandeur, l'évaluation de l'incertitude dans les résultats finaux (mesurandes) de la tâche de mesure. Cependant, il est souvent très complexe d'évaluer l'incertitude dans le cas des nombreuses tâches de mesure effectuées par un SMT. Dans ces cas, une estimation non réaliste de l'incertitude liée à la tâche est susceptible de se produire.

Le présent document a pour objet de fournir une méthode et les procédures associées pour l'évaluation de l'incertitude de mesure de tâches de mesure spécifiques réalisées à l'aide d'un SMT. La méthode peut s'appliquer aux machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) cartésiennes équipées de systèmes de palpé tactile. Cette méthode peut éventuellement être appliquée à d'autres SMT, cependant, la différence de cinématique du SMT et le modèle d'erreur approprié nécessitent d'être pris en compte. Il ne s'agit pas d'un effort insignifiant que de déterminer quelles orientations de mesure peuvent introduire de l'aléatoire dans les erreurs systématiques dans le cadre de l'utilisation de ce SMT. Le présent document est une Spécification technique et, à ce titre, un retour d'information est recherché concernant son utilisation et ses performances dans son domaine d'application (c'est-à-dire sur la MMT cartésienne de contact). Il est attendu que d'autres types de SMT fassent l'objet de diverses études. Étant donné que ces études peuvent être menées (peut-être avec des adaptations de la méthode à la technologie particulière d'un SMT, par exemple, la cinématique), un retour d'information sur ces autres technologies est également bienvenu.

L'étalonnage des pièces est une application possible de la méthode décrite dans le présent document. La pièce et les résultats d'étalonnage correspondants peuvent être utilisés comme "pièces étalonnées" dans l'ISO 15530-3. Les valeurs d'étalonnage et leurs incertitudes d'étalonnage sont obtenues à partir du présent document.

La vérification de la conformité des pièces par rapport à leurs spécifications géométriques conformément à l'ISO 14253-1 ou à l'ISO/TR 14253-6 constitue une autre application possible. La méthode décrite dans le présent document fournit les valeurs et les incertitudes des caractéristiques géométriques spécifiées, qui sont utilisées comme valeurs d'essai et bande de garde.

L'estimation de l'incertitude de mesure spécifique d'une tâche (voir l'ISO/TS 15530-1) dans le cadre de la méthode PUMA de l'ISO 14253-2, par laquelle l'utilisateur d'une MMT peut comparer des conditions de mesure différentes, par exemple un nombre moindre de répétitions de mesure, constitue une autre application possible.

Sample Document

get full document from standards.iteh.ai

Spécification géométrique des produits (GPS) — Machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) : Technique pour la détermination de l'incertitude de mesure —

Partie 2:

Utilisation de plusieurs orientations de la pièce et d'étalons simples étalonnés

1 Domaine d'application

Le présent document décrit une procédure d'évaluation de l'incertitude des mesures effectuées à l'aide de machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) cartésiennes tactiles.

L'incertitude de mesure évaluée conformément au présent document indique la performance de l'opération de mesure individuelle, qui n'est ni la capacité de mesure ni l'incertitude d'essai lors du contrôle de performance de la MMT par rapport à ses erreurs maximales tolérées (EMT).

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application 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 1101, *Spécification géométrique des produits (GPS) — Tolérancement géométrique — Tolérancement de forme, orientation, position et battement*

ISO 10360-1, *Spécification géométrique des produits (GPS) — Essais de réception et de vérification périodique des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) — Partie 1: Vocabulaire*

ISO/TS 15530-1, *Spécification géométrique des produits (GPS) — Machines à mesurer tridimensionnelles (MMT): Technique pour la détermination de l'incertitude de mesure — Partie 1: Vue d'ensemble et caractéristiques métrologiques*

Guide ISO/IEC 99, *Vocabulaire international de métrologie — Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*

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

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et les définitions de l'ISO 1101, l'ISO 10360-1, l'ISO/TS 15530-1, le Guide ISO/IEC 99, le Guide ISO/IEC 98-3, 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

modèle d'échantillonnage nominal

points de mesure dans un modèle convenu, extraits de la pièce et utilisés pour associer une ou plusieurs caractéristiques présentant un intérêt

Note 1 à l'article: Les modèles d'échantillonnage nominaux sont des parties essentielles des définitions du mesurande et il faut indiquer clairement leur désignation, par exemple dans les protocoles de mesure.

3.2

facteur d'incertitude non détecté

facteur d'incertitude non détecté par l'utilisation décrite de plusieurs orientations de pièce et d'étalons simples étalonnés

Note 1 à l'article: Les contributeurs à l'incertitude non détectés sont expliqués dans l'[Annexe E](#).

4 Symboles

Pour les besoins du présent document, les symboles donnés dans le [Tableau 1](#) s'appliquent.

Tableau 1 — Symboles

Symbole	Définition
$u(y_{\text{result}})$	incertitude-type du résultat final corrigé du mesurage
$U(y_{\text{result}})$	incertitude étendue du résultat final corrigé du mesurage
k	facteur d'élargissement pour l'utilisation de l'étalonnage
i	indice du mesurage actuel dans une série de mesurages répétés
j	indice de l'orientation actuelle de la pièce, ou, indice du stylet du palpeur
h	indice de l'ID du point de mesure dans le modèle d'échantillonnage nominal, ou, indice de l'étalon de longueur
n_{WR}	nombre de mesurages répétés de la pièce dans une seule orientation, où W signifie «pièce», d'après le terme «workpiece» en anglais et R signifie «mesurages répétés», d'après le terme «repeated measurements» en anglais
n_{WO}	nombre d'orientations d'une pièce, où W signifie «pièce», d'après le terme «workpiece» en anglais et O signifie «orientations de la pièce»
n_{LR}	nombre de mesurages répétés d'un étalon de longueur dans une seule orientation, où L signifie «étalon de longueur», d'après le terme «length standard» en anglais et R signifie «mesurages répétés», d'après le terme «repeated measurements» en anglais
n_{LO}	nombre d'orientations de l'étalon de longueur, où L signifie «étalon de longueur», d'après le terme «length standard» en anglais et O signifie «orientations de l'étalon de longueur», d'après le terme «orientations of the length standard» en anglais
n_{LN}	nombre d'étalon(s) de longueur mesuré(s) dans une seule orientation, où L signifie «étalon de longueur», d'après le terme «length standard» en anglais et N signifie «nombre d'étalon(s) de longueur»
n_{PR}	nombre de mesurages répétés d'un étalon de vérification du palpeur avec un seul stylet, où P signifie «stylet du palpeur», d'après le terme «probe stylus» en anglais et R signifie «mesurages répétés», d'après le terme «repeated measurements» en anglais
n_{PO}	nombre d'orientations des stylets du palpeur à utiliser, où P signifie «stylet du palpeur», d'après le terme «probe stylus» en anglais et O signifie «orientation du stylet du palpeur»
n_{MP}	nombre de points de mesure dans un modèle d'échantillonnage nominal, où M signifie «mesure» et P signifie «points»
y_{ij}	valeur mesurée; orientation j ($1 \leq j \leq n_{\text{WO}}$) de la pièce, répétition i ($1 \leq i \leq n_{\text{WR}}$)
y_{ijh}	valeur mesurée au h ème point de la pièce ($1 \leq h \leq n_{\text{MP}}$); orientation j ($1 \leq j \leq n_{\text{WO}}$) de la pièce, répétition i ($1 \leq i \leq n_{\text{WR}}$)
w_{ij}	valeur mesurée pour l'étalonnage/essai; orientation j ($1 \leq j \leq n_{\text{OW}}$) de la pièce, répétition i ($1 \leq i \leq n_{\text{WR}}$)
y_{result}	valeur de résultat d'étalonnage/d'essai de l'élément

Tableau 1 (suite)

Symbole	Définition
y	résultat de mesure brut, sans correction de l'erreur de justesse
W	valeur de mesure brute de l'étalonnage/l'essai
y_{corr}	résultat de mesure avec correction de l'erreur de justesse
E_S	erreur d'échelle moyenne de la MMT dans la région concernée
$L_{\text{Meas.}ij}$	valeur mesurée de l'étalon de longueur; orientation j ($1 \leq j \leq n_{LO}$), répétition i ($1 \leq i \leq n_{LR}$)
$L_{\text{Meas.}ijh}$	valeur mesurée du h ème étalon de longueur ($1 \leq h \leq n_{LN}$); orientation j ($1 \leq j \leq n_{LO}$), répétition i ($1 \leq i \leq n_{LR}$)
u_S	incertitude-type attribuée à l'erreur d'échelle
E_D	erreur moyenne de la qualification de taille du palpeur
$D_{\text{Meas.}ij}$	valeur mesurée du diamètre de l'étalon de vérification du palpeur; stylet j ($1 \leq j \leq n_{PO}$), répétition i ($1 \leq i \leq n_{PR}$)
u_D	incertitude-type attribuée à l'erreur de taille du palpeur
E_{PrbLoc}	erreur moyenne de la qualification de position du palpeur
$D_{\text{MCS.}i}$	diamètre de la sphère du minimum circonscrit englobant les centres des sphères des moindres carrés de l'étalon de vérification du palpeur, mesuré avec les stylets n_{PO} du palpeur; répétition i ($1 \leq i \leq n_{PR}$)
u_{PrbLoc}	incertitude-type attribuée à l'erreur de position du palpeur
$u_{WR}(y)$	incertitude-type attribuée à la répétabilité de la mesure de la pièce
$u_{W0}(y)$	incertitude-type attribuée aux erreurs systématiques aléatoires de la géométrie et de l'environnement de la MMT
$u_{W0 \times \text{dist}}(y)$	incertitude-type attribuée à l'interaction entre l'erreur de la géométrie et de l'environnement de la MMT et les points de mesure du modèle d'échantillonnage nominal sur la composante de l'élément
u_{temp}	incertitude-type attribuée aux effets liés à la température
u_{UUC}	contributeur à l'incertitude qui n'est pas détecté par la méthode décrite dans le présent document et qui a été évalué par d'autres méthodes appropriées

5 Exigences relatives à l'évaluation de l'incertitude

La méthode exige que le mesurage de chaque élément géométrique soit effectué avec le modèle d'échantillonnage nominal des points de mesure sur la surface de l'élément géométrique. La définition du nombre de points de mesure et du système d'échantillonnage font partie de la conception de la stratégie de mesure; par conséquent, ils doivent être sélectionnés pour être adaptés aux besoins de l'essai. Le présent document ne spécifie ni le nombre par défaut de points de mesure sur la surface de l'élément géométrique ni le modèle d'échantillonnage par défaut.

Le nombre de points et leur modèle (défini en dehors du domaine d'application du présent document) sont des sources d'incertitude de mesure, mais ces composantes d'incertitude ne sont pas détectées dans la présente méthode et sont expliquées dans l'[Annexe E](#).

De même, la spécification de l'association, par exemple de Gauss ou Chebychev, fait partie de la conception du protocole d'essai; par conséquent, elle est hors du domaine d'application du présent document même si elle peut être une source d'incertitude de mesure non détectée. Le présent document ne spécifie pas l'association à utiliser. Les initialisations, conditions et procédures préliminaires appliquées, ou qui s'appliqueront, à la mesure réelle de la pièce doivent être retenues pendant les mesures pour évaluer l'incertitude telle que décrite dans le présent document.

NOTE 1 Savoir si et comment la MMT compense ses erreurs de géométrie constitue un exemple de condition.

NOTE 2 La configuration et la qualification du palpeur constituent des exemples de procédures préliminaires.

6 Principe de mesurage et d'évaluation de l'incertitude

Fondamentalement, une MMT mesure les coordonnées d'un point unique. Les dimensions et les écarts géométriques des éléments sont calculés à partir de l'ensemble de points de mesure échantillonnés par la MMT. Par conséquent, l'incertitude dans la valeur mesurée des dimensions ou des écarts géométriques est déduite de l'incertitude de chaque coordonnée de point. Cela est une combinaison de divers contributeurs à l'incertitude, qui sont difficiles à évaluer individuellement en raison de la complexité de la tâche de mesure d'une MMT.

Dans la pratique, les incertitudes combinées des mesures sont dominées par des erreurs aléatoires et systématiques. Lorsqu'une pièce est mesurée sur une MMT dans une seule orientation, les coordonnées mesurées d'un point unique du système de coordonnées de la pièce incluent des erreurs aléatoires et systématiques. Les erreurs déduites des contributeurs sont propagées aux coordonnées machine de la MMT. Les contributions de ces facteurs à l'incertitude de mesure se propagent et sont classées en composantes, telles que les éléments énumérés dans un bilan d'incertitude.

Si un mesurage est effectué dans une orientation et un environnement fixes, alors le résultat de ce mesurage est biaisé par des erreurs systématiques. Même si le mesurage est répété et si les résultats de mesure sont moyennés, l'erreur de justesse engendrée par l'orientation et l'environnement n'est ni éliminée ni réduite. Pour éliminer ou réduire l'effet de l'erreur de justesse et pour en évaluer l'amplitude, des mesures supplémentaires indépendantes sont nécessaires (voir Annexe [E.3](#)).

Une conception expérimentale appropriée peut aider à réduire l'impact des erreurs systématiques inconnues en les randomisant. Une approche efficace consiste à utiliser plusieurs techniques de mesure. Différents instruments ou conditions d'environnement introduisent des erreurs systématiques uniques. Lorsqu'elles sont combinées, ces erreurs varient d'un mesurage à l'autre, de sorte qu'elles apparaissent plutôt comme des erreurs aléatoires. Cette approche atténue l'influence de l'erreur de justesse systématique et améliore l'exactitude des résultats.

Dans la procédure du présent document, une pièce est mesurée dans différentes orientations sur une MMT. Cette approche introduit de l'aléatoire dans la contribution de nombreuses erreurs systématiques dans les mesurages respectifs en faisant varier l'amplitude et le coefficient de propagation de l'erreur par rapport aux résultats mesurés. L'erreur systématique de mesure de la MMT est autocorrélée avec la position et l'orientation de la pièce mesurée sur la MMT, ce qui signifie que les points proches présentent des erreurs systématiques similaires. Cette autocorrélation décroît avec la distance par rapport à la position et à l'orientation d'origine. L'effet de cette erreur systématique est supposé suivre une distribution normale avec une valeur attendue de zéro et un écart-type de $u_{w0}(y)$. L'effet de l'erreur systématique est alors idéalement neutralisé en faisant la moyenne des résultats de mesure dans différentes orientations choisies pour la randomisation et devient une erreur systématique aléatoire.

NOTE Certaines erreurs systématiques ne sont possiblement pas suffisamment aléatoires, telles que celles dues à la fixation, voir [Annexe E](#).

Les contributions des erreurs aléatoires et des erreurs systématiques dans les mesures à orientations multiples sont évaluées en utilisant l'analyse de variance des mesures répétées à deux sens de marche (appelée «ANOVA» dans le présent document). ANOVA sépare la variance totale en composantes attribuées à des facteurs distincts, tels que des sources aléatoires et systématiques, sans double comptage. Cette méthode permet d'identifier les sources critiques d'incertitude de mesure en isolant leurs contributions respectives.

Plus précisément, les erreurs aléatoires correspondent à la variance à l'intérieur des groupes, alors que les erreurs systématiques sont associées à la variance entre les groupes. Les calculs simples de la variance entre les groupes à partir des données de mesure brutes incluent intrinsèquement la variance intra-groupe, conduisant à un double comptage dans les évaluations de l'incertitude. Pour résoudre ce problème, ANOVA isole la variance entre les groupes, en s'assurant qu'elle ne représente que les contributions d'erreurs systématiques sans chevauchement à partir d'erreurs aléatoires. Cette distinction est essentielle pour la quantification exacte de l'incertitude dans les expériences de mesure.

Même en réalisant des mesurages à orientations multiples, certaines erreurs systématiques des mesurages de la MMT ne sont toujours pas aléatoires. Les erreurs dominantes qui ne sont pas aléatoires sont l'erreur d'échelle de la MMT et l'erreur de qualification du palpeur. Les effets respectifs de ces erreurs sont évalués

et, si nécessaire, corrigés. De plus, leurs contributions à l'incertitude de mesure sont évaluées et incluses dans le calcul de l'incertitude de mesure.

7 Procédure

7.1 Mesurages

7.1.1 Généralités

La [Figure 1](#) montre l'organigramme de l'opération décrite dans le présent document. Le mode opératoire de mesure complet comprend trois étapes:

- a) mesurages multiples de la pièce;
- b) mesures des étalons de longueur;
- c) mesures d'une sphère d'essai.

Tous les mesurages sont effectués dans la même portion du volume de mesure de la MMT.

Les mesurages répétitifs dans une orientation sont réalisés sans réalignement.

Les mesurages multiples de la pièce sont réalisés par répétition avec plusieurs orientations de pièce présentant la même répartition des points de palpation et la même stratégie de mesure. Cette procédure est destinée à randomiser les erreurs systématiques de la MMT, y compris les fluctuations environnementales autour de la MMT.

Les mesurages des étalons de longueur, tels qu'une cale étalon, sont effectués avec l'étalon dans trois directions perpendiculaires les unes aux autres, généralement le long des axes X, Y et Z de la MMT. Cette procédure est destinée à saisir les erreurs d'échelle de la MMT, y compris les effets thermiques. Il convient de mesurer l'étalon de longueur à proximité ou à la position de la pièce.

Les mesurages d'une sphère d'essai sont réalisés avec tous les stylets de palpeur utilisés pour les étapes précédentes et en appliquant le ou les même(s) mode(s) de palpation que celui ou ceux utilisé(s) pour les étapes précédentes. Cette procédure est destinée à examiner les erreurs de palpation.

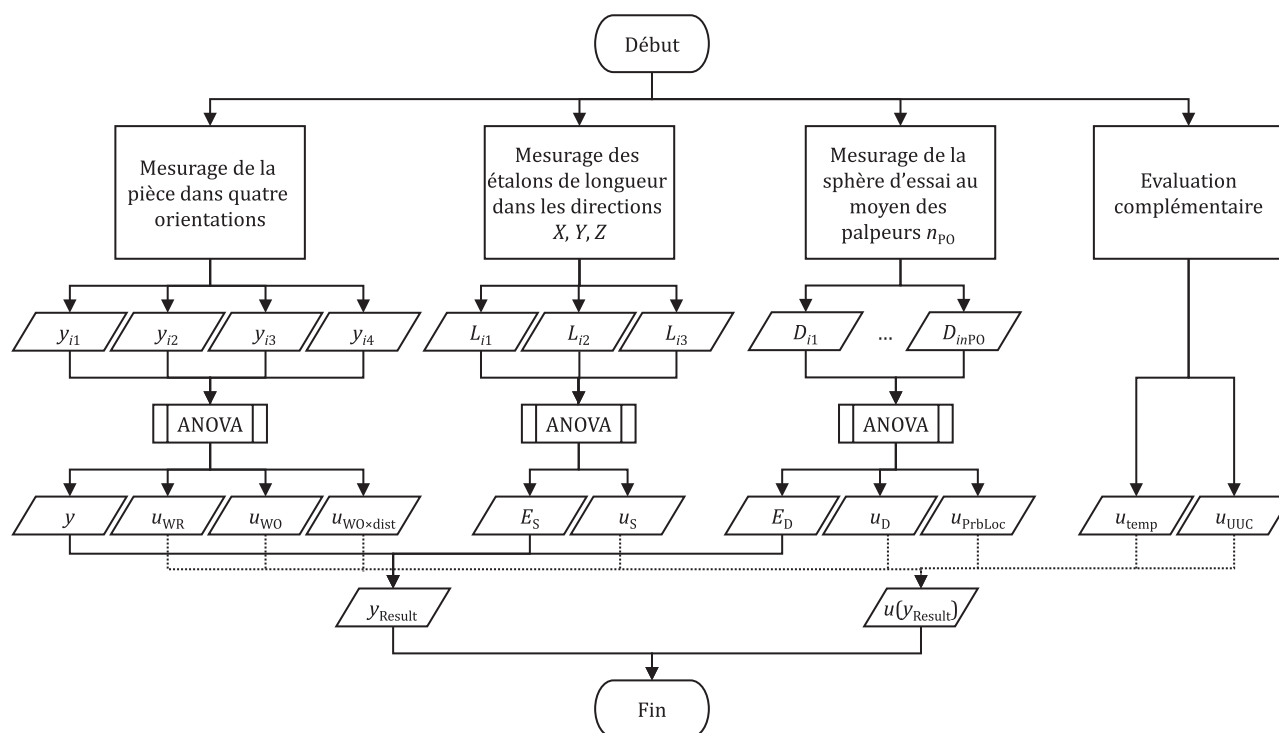


Figure 1 — Diagramme de flux de la procédure de fonctionnement

7.1.2 Mesurages multiples sur la pièce

La pièce est mesurée par défaut en quatre orientations. Des mesurages dans un plus grand nombre d'orientations peuvent être effectués pour mieux randomiser l'effet systématique. La [Figure 2](#) montre un exemple d'installation de mesure d'une pièce sur la MMT. Une orientation est appelée la «position de départ». Les autres sont des exemples d'orientations pour introduire de l'aléatoire dans les effets systématiques de la MMT.

Pour éviter un résultat biaisé et pour éviter la sous-estimation de l'incertitude de mesure, la diversité des orientations de la pièce doit être soigneusement prise en considération. Une variété insuffisante d'orientations de pièces peut ne pas introduire d'aléatoire dans l'effet systématique de la MMT. Cela peut conduire à la présence d'erreurs de justesse inconnues et non compensées dans les résultats d'étalonnage/d'essai, résultant en une sous-estimation de l'incertitude de mesure.

L'orientation de la pièce doit être choisie dans les conditions d'essai assignées de la mesure de la pièce. Outre la position de départ, trois orientations sont recommandées, obtenues par rotation de l'artéfact en position de départ de 90° autour du premier axe de la MMT, obtenue par rotation de l'artéfact en position de départ de 90° autour du deuxième axe de la MMT et obtenue par rotation de l'artéfact en position de départ de 90° autour du troisième axe de la MMT.

Lorsque l'orientation de la pièce par rapport à la direction de la force de gravitation est spécifiée dans le cadre du protocole d'essai, toute orientation de mesure doit satisfaire à cette spécification.

Les mesurages sont réalisés avec une répartition identique des points de mesure (le même modèle d'échantillonnage) et avec une stratégie de mesure identique, c'est-à-dire le nombre et les positions nominales des points de mesure pour l'extraction (voir l'ISO 14406) ainsi que la stratégie de palpement et l'analyse des points de données (par exemple filtrage) sont identiques pour toutes les orientations. Dans le cas où la méthode s'applique à l'étalonnage de la pièce, la répartition réelle des points mesurés doit être enregistrée.

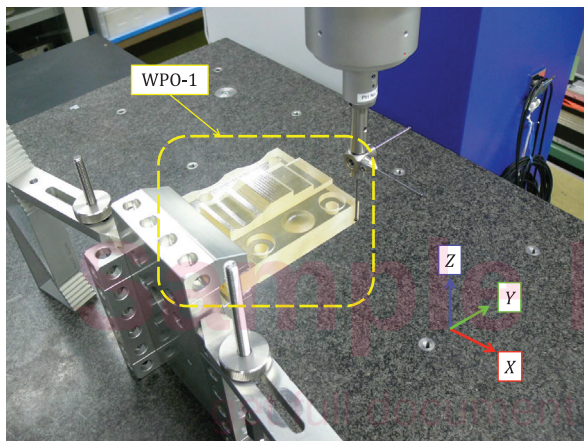
Le nombre de répétitions pour chaque orientation est de trois par défaut.

Lorsqu'une MMT est connue pour présenter une mauvaise répétabilité, par exemple, la MMT a présenté une grande valeur R_0 dans son essai d'acceptation/vérification ou est spécifiée avec une grande valeur $R_{0,MPE}$ conformément à l'ISO 10360-2, le nombre de répétitions peut être augmenté à la discrétion de l'utilisateur de la MMT. Par exemple, l'utilisateur de la MMT a choisi le nombre approprié de répétitions par rapport à l'objectif du mesurage par procédé PUMA (voir l'ISO 14253-2).

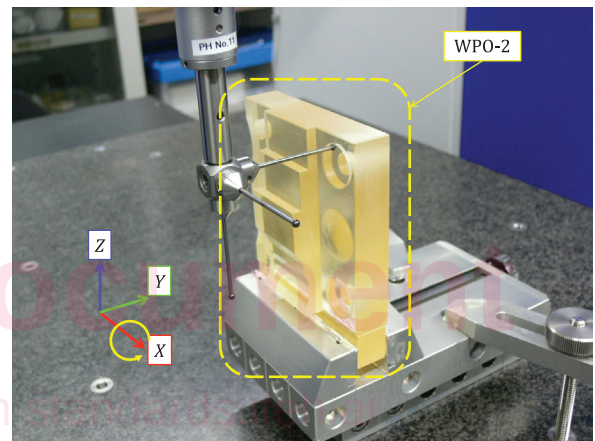
Idéalement, il convient que la méthode de montage de la pièce soit identique pour chacune des quatre orientations. Cependant, en raison de la forme de la pièce, la méthode de montage de la pièce, par exemple le serrage, peut être différente. Pour réaliser une série de mesurages valide, les aspects suivants doivent être contrôlés:

- La déformation de la pièce due au montage doit être prise en compte et également être contrôlée.
- La déformation non maîtrisée et exaptationnelle de la pièce peut être la source de contributeurs supplémentaires à l'incertitude de mesure, en particulier si les déformations sont fortes et différentes entre les orientations.

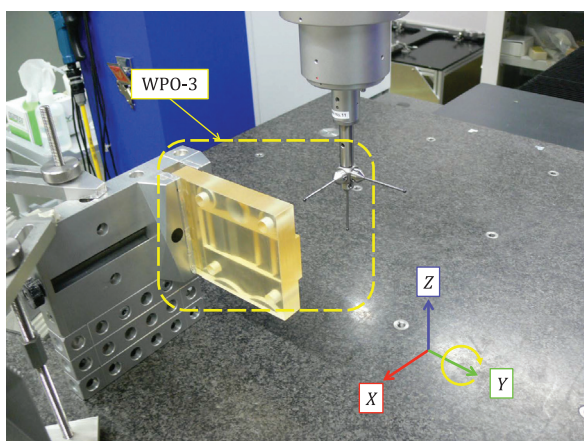
Les résultats de tous ces mesurages sont les valeurs y_{ij} (voir [Tableau 2](#)), où $j = 1 \dots n_{WO}$ indique l'orientation et $i = 1 \dots n_{WR}$ indique la répétition dans la même orientation.



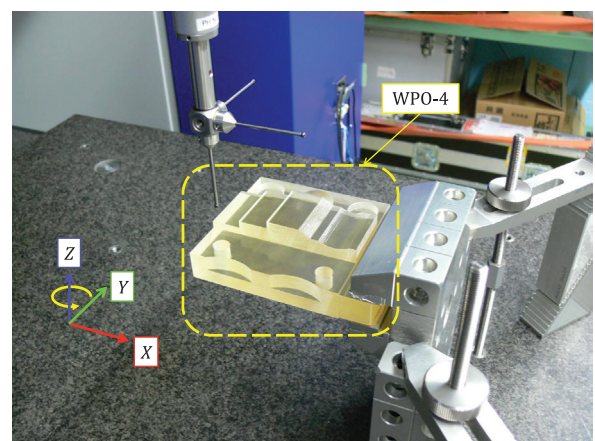
a) Orientation 1
(position de départ)



b) Orientation 2
(Exemple: rotation de 90° par rapport à la position de départ autour du premier axe de la MMT)



c) Orientation 3
(Exemple: rotation de 90° par rapport à la position de départ autour du deuxième axe de la MMT)



d) Orientation 4
(Exemple: rotation de 90° par rapport à la position de départ autour du troisième axe de la MMT)

Légende

X	axe X du système de coordonnées sur la MMT
Y	axe Y du système de coordonnées sur la MMT
Z	axe Z du système de coordonnées sur la MMT
WPO- i ($i = 1, 2, 3, 4$)	pièce à l'orientation- i

Figure 2 — Exemple d'installation de mesurage de la pièce dans quatre orientations**Tableau 2 — Résumé des résultats de mesure de la pièce**

	Orientation 1 (position de départ)	Orientation 2	Orientation 3	Orientation 4
Répétition 1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}
Répétition 2	y_{21}	y_{22}	y_{23}	y_{24}
Répétition 3	y_{31}	y_{32}	y_{33}	y_{34}

7.1.3 Mesurages des étalons de longueur

Les étalons de longueur matérialisés (ou un étalon simple comportant plusieurs longueurs d'essai) sont mesurés dans la même portion du volume de la MMT que celle où la pièce est mesurée. Les résultats des mesurages des étalons de longueur sont utilisés à deux fins:

- pour la compensation de l'erreur d'échelle de la MMT dans la région concernée lorsqu'elle est corrigée, et
- pour l'évaluation de l'incertitude issue de cette erreur d'échelle.

Les mesurages des étalons de longueur sont réalisés dans au moins trois orientations afin de quantifier l'erreur d'échelle spatiale tridimensionnelle de la MMT dans la portion du volume de la MMT. Les orientations sont approximativement orthogonales les unes par rapport aux autres, généralement alignées sur les axes de la MMT. Un exemple de montage est donné à la [Figure 3](#).

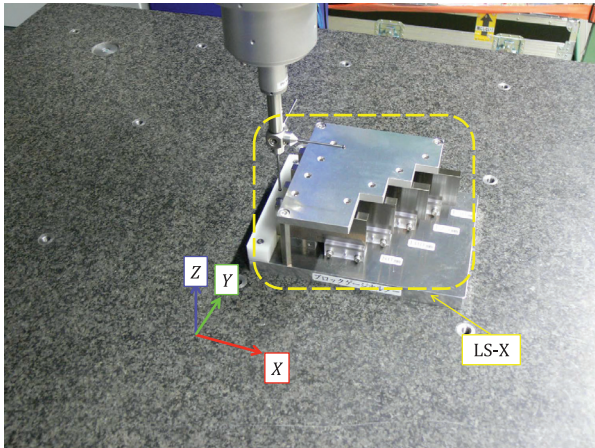
Dans chaque orientation, les étalons de longueur sont mesurés au moins trois fois.

NOTE Lorsqu'il est a priori connu que la répétabilité de mesure de la MMT à utiliser est significativement élevée, le nombre de répétitions peut être supérieur au nombre par défaut de trois.

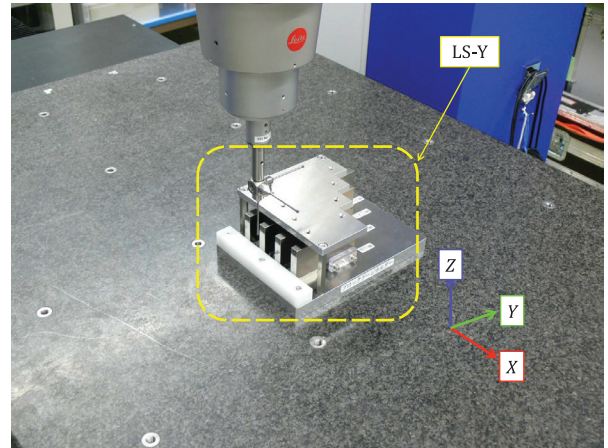
Les résultats sont les valeurs $L_{\text{Meas},ij}$ du [Tableau 3](#) et du [Tableau 4](#) avec $j = 1 \dots n_{LO}$ indiquant l'orientation et $i = 1 \dots n_{LR}$ indiquant les répétitions dans la même orientation.

Dans le cas où la taille maximale de la pièce à mesurer est petite ou si le but du mesurage de la pièce est l'essai de réception de cette pièce, le mesurage à l'aide d'un étalon de longueur unique peut être suffisant, même si la pièce a plusieurs entités dimensionnelles.

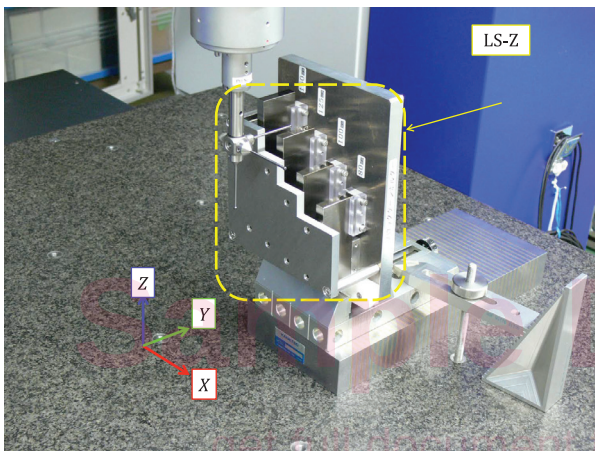
Idéalement, les valeurs de l'erreur d'échelle sont détectées sans l'influence des erreurs de palpation. Il est donc recommandé de mesurer les étalons de longueur de manière unidirectionnelle (voir l'ISO 10360-2:2009, Annexe B) ou à d'une manière E_{Vol} (voir l'ISO 10360-13:2021, 3.12).



a) Orientation 1
(Exemple: direction de l'axe X)



b) Orientation 2
(Exemple: direction de l'axe Y)



c) Orientation 3
(Exemple: direction de l'axe Z)

Légende

X	axe X du système de coordonnées sur la MMT
Y	axe Y du système de coordonnées sur la MMT
Z	axe Z du système de coordonnées sur la MMT
LS- <i>i</i> (<i>i</i> = X, Y, Z)	étalons de longueur dans le sens de <i>i</i>

Figure 3 — Installation de mesure de l'étalon de longueur dans trois directions mutuellement orthogonales

Tableau 3 — Résumé des résultats de mesure de l'étalon de longueur (pour ANOVA)

	Orientation 1 (direction de l'axe X)	Orientation 2 (direction de l'axe Y)	Orientation 3 (direction de l'axe Z)
Répétition 1	$L_{\text{Meas.11}}$	$L_{\text{Meas.12}}$	$L_{\text{Meas.13}}$
Répétition 2	$L_{\text{Meas.21}}$	$L_{\text{Meas.22}}$	$L_{\text{Meas.23}}$
Répétition 3	$L_{\text{Meas.31}}$	$L_{\text{Meas.32}}$	$L_{\text{Meas.33}}$