

Techniques de la mécanique

von

Josef Dillinger, Walter Escherich, Werner Günter, Max Heinzler, Eckhard Ignatowitz, Stefan Oesterle, Ludwig Reißler, Andreas Stephan, Reinhard Vetter

1. Auflage 2012

Europa Lehrmittel 2012

Verlag C.H. Beck im Internet:
www.beck.de

ISBN 978 3 8085 1166 4



Techniques de la mécanique

1ère édition

MAISON D'ÉDITION EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselderger Straße 23 · D-42781 Haan-Gruiten

N° Europa : 11664

Titre original: Fachkunde Metall (56ème édition 2010)

Auteurs :

Dillinger, Josef	Directeur hors classe	D-Munich
Escherich, Walter	Directeur hors classe	D-Munich
Günter, Werner	Ingénieur diplômé (Dipl.-Ing.)	D-Oberwolfach
Heinzler, Max	Ingénieur diplômé (Dipl.-Ing.)	D-Wangen im Allgäu
Ignatowitz, Dr Eckhard	Docteur ingénieur (Dr.-Ing.)	D-Waldbronn
Oesterle, Stefan	Ingénieur diplômé (Dipl.-Ing.)	D-Amtzell
Reißler, Ludwig	Directeur hors classe	D-Munich
Stephan, Andreas	Ingénieur diplômé (Dipl.-Ing.)	D-Kressbronn
Vetter, Reinhard	Directeur hors classe	D-Ottobeuren

Les auteurs sont des ingénieurs et des enseignants spécialisés dans la formation technique.

Techniques de la mécanique

Relecture:

Caquereau Jacques, CFP, CH-Sion
 Carrera Miguel, CFP, CH-Sion
 Gosteli Pascal, ceff, CH-Moutier
 Jeanrichard Claude-Alain, ETML, CH-Lausanne
 Kohler Marc-André, CEJEF, CH-Porrentruy
 Kottelat Jean-Claude, CEJEF, CH-Delémont
 Vallaro Giovanni, CFP, CH-Sion
 Voumard Claude-Michel, ceff, CH-Moutier
 Enseignants division mécanique EPSIC, CH-Lausanne

Responsable de projet:

Oliver Schmid, Swissmem Formation professionnelle, CH-Winterthur

Images : Les auteurs
 Photos : Prêts des entreprises (répertoriées page 581)
 Traitement d'image : Bureau de dessin de la maison d'édition Europa-Lehrmittel, D-Ostfildern

1ère édition 2012

Impression 6 5 4 3 2 1

Toutes les impressions de la même édition peuvent être utilisées parallèlement pour l'enseignement car elles sont identiques, mises à part la possible correction de fautes typographiques et de petites modifications, par ex. en raison de l'édition de nouvelles normes.

ISBN 978-3-8085-1166-4

Maquette de la couverture sur une photographie de l'entreprise TESA/Brown & Sharpe, CH-Renens

Tous droits réservés. L'ouvrage est protégé par des droits d'auteur. Toute utilisation au-delà des cas réglés par la loi doit faire l'objet d'une autorisation écrite de la maison d'édition.

© 2012 by Maison d'édition Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, D-42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Composition : Satz+Layout Werkstatt Kluth GmbH, D-50374 Erftstadt
 Impression : M. P. Media-Print Informationstechnologie GmbH, D-33100 Paderborn

Préface de la 1^{ère} édition

L'enseignement professionnel dans le domaine de la métallurgie sert à la formation et au perfectionnement dans les métiers de la construction mécanique.

Métiers concernés

- Polymécaniciens/nes
- Dessinateurs/trices-constructeurs/trices industriels/les
- Constructeurs/trices d'appareils industriels
- Mécaniciens/nes de production
- Praticiens/nes en mécanique
- Contremaîtres et techniciens/nes
- Stagiaires et étudiants/tes

Contenu

Le contenu de ce livre est articulé sur huit chapitres principaux. Il est en accord avec les plans de formation et les ordonnances des groupes professionnels susmentionnés et adapté à l'évolution dans le domaine technique.

Dans l'index alphabétique, les termes sont également disponibles en anglais.

CD

Ce livre contient un CD avec toutes les images.

Pour cette 1^{ère} édition, Swissmem et l'éditeur Europa-Lehrmittel ont traduit en français la 56^{ème} édition de l'ouvrage «Fachkunde Metall», extrêmement populaire dans tout l'espace germanophone.

Comme dans le passé, les auteurs et la maison d'édition remercient d'avance tous les utilisateurs du livre «Techniques de la mécanique» pour toute information critique et proposition d'amélioration.

1 Métrologie dimensionnelle

2 Management de la qualité

7 ... 80

3 Technique de fabrication

81 ... 236

4 Technique des matériaux

237 ... 328

5 Technique des machines et des appareils

329 ... 457

6 Technique d'automation

458 ... 552

7 Technique de l'information

8 Électrotechnique

553 ... 580

1 Métrologie dimensionnelle

7

1.1	Grandeurs et unités	8	1.4	Contrôle des états de surfaces	36
1.2	Bases de la métrologie	10	1.4.1	Profil des surfaces	36
1.2.1	Notions de base	10	1.4.2	Paramètres d'état de surface	37
1.2.2	Écart de mesure	13	1.4.3	Procédés de contrôle des surfaces	38
1.2.3	Capabilité des moyens de contrôle et surveillance des moyens de contrôle	16	1.5	Tolérances et ajustements	40
1.3	Moyens de contrôle des longueurs	18	1.5.1	Tolérances	40
1.3.1	Règles de mesure, règles à filament, cales étalons d'angles, jauges et cales étalon	18	1.5.2	Ajustements	44
1.3.2	Instruments de mesure mécaniques et électroniques	21	1.6	Contrôle de la forme et de la position	48
1.3.3	Instruments de mesure pneumatiques	29	1.6.1	Tolérances de formes et de positions	48
1.3.4	Instruments de mesure électroniques	31	1.6.2	Contrôle de surfaces planes et inclinées	50
1.3.5	Instruments de mesure optoélectroniques	32	1.6.3	Contrôle de la circularité, de la coaxialité et du battement	53
1.3.6	Technique multicapteurs dans des instruments de mesure des coordonnées	34	1.6.4	Contrôle des filetages	58
			1.6.5	Contrôle de la conicité	60

2 Management de la qualité

61

2.1	Domaines de travail du MQ	61	2.7.4	Distribution hétérogène des caractéristiques essentielles	69
2.2	La série de normes EN ISO 9000	62	2.7.5	Caractéristiques de la distribution gaussienne d'échantillons	70
2.3	Exigences de qualité	62	2.7.6	Contrôle de la qualité selon la procédure d'échantillonnage	71
2.4	Caractéristiques de qualité et défauts	63	2.8	Capabilité des procédés	72
2.5	Outils du management de la qualité	64	2.9	Performance des procédés	75
2.6	Maîtrise de la qualité	67	2.10	Maîtrise statistique des procédés au moyen de cartes de contrôle de la qualité	76
2.7	Assurance de la qualité	68	2.11	Audit et certification	79
2.7.1	Planification des contrôles	68	2.12	Processus d'amélioration continu : les collaborateurs optimisent les procédés	80
2.7.2	Probabilité	68			
2.7.3	Distribution normale des caractéristiques essentielles	69			

3 Technique de fabrication

81

3.1	Sécurité au travail	82	3.6.2	Sciage	120
3.1.1	Symboles de sécurité	82	3.6.3	Perçage, taraudage, fraisage, alésage	122
3.1.2	Causes d'accidents	83	3.6.4	Tournage	134
3.1.3	Mesures de sécurité	83	3.6.5	Fraisage	154
3.2	Les différents procédés de fabrication	84	3.6.6	Rectification	171
3.2.1	Principaux groupes de procédés de fabrication	84	3.6.7	Superfinition	183
3.3	Moulage	86	3.6.8	Enlèvement par électro-érosion	189
3.3.1	Moules et modèles	86	3.6.9	Dispositifs et éléments de serrage sur des machines-outils	193
3.3.2	Moulage en moules perdus	87	3.6.10	Exemple de fabrication d'une bride de serrage	200
3.3.3	Moulage en moules permanents	90	3.7	Assemblage	204
3.3.4	Matériaux de moulage	91	3.7.1	Procédé d'assemblage	204
3.3.5	Défauts de coulée	91	3.7.2	Assemblage par sertissage et par enclenchement	207
3.4	Formage	92	3.7.3	Collage	209
3.4.1	Comportement des matériaux lors du formage	92	3.7.4	Brasage	211
3.4.2	Procédés de formage	92	3.7.5	Soudage	217
3.4.3	Déformation plastique par flexion	93	3.8	Enduction	230
3.4.4	Déformation plastique par traction et compression	96	3.8.1	Enduction avec des peintures et des matières plastiques	230
3.4.5	Déformation plastique par compression	100	3.8.2	Enduction de métaux	232
3.4.6	Presses	102	3.8.3	Enductions avec des caractéristiques particulières	233
3.5	Coupe	103	3.9	Atelier de fabrication et protection de l'environnement	234
3.5.1	Cisaillage	103			
3.5.2	Découpage sans contact	108			
3.6	Usinage par enlèvement de copeaux	112			
3.6.1	Bases	112			

4 Technique des matériaux**237**

4.1	Aperçu des matériaux et des matières auxiliaires	238	4.8.7	Trempe superficielle	286
4.2	Choix et propriétés des matériaux	240	4.8.8	Exemple de fabrication : traitement thermique d'une griffe de serrage	289
4.3	Structure intérieure des métaux	246	4.9	Essai des matériaux	290
4.4	Aciers et matériaux de fonte de fer	251	4.9.1	Essai des propriétés d'usinage	290
4.4.1	Obtention de la fonte brute	251	4.9.2	Contrôle des propriétés mécaniques	291
4.4.2	Fabrication d'acier	252	4.9.3	Essai de résilience	293
4.4.3	Système de désignation des aciers	255	4.9.4	Essais de dureté	294
4.4.4	Classification des aciers selon leur composition et leurs classes de qualité	258	4.9.5	Essai de résistance limite d'endurance	298
4.4.5	Les nuances d'acier et leur utilisation	259	4.9.6	Essai de charge en fonctionnement	299
4.4.6	Formes commerciales des aciers	261	4.9.7	Contrôles de matériaux non destructifs	299
4.4.7	Éléments d'alliage et d'accompagnement des aciers et des matériaux en fonte de fer	262	4.9.8	Contrôles métallographiques	300
4.4.8	Fusion des matériaux en fonte de fer	263	4.10	Corrosion et protection contre la corrosion	301
4.4.9	Le système de désignation des matériaux en fonte de fer	264	4.10.1	Causes de corrosion	301
4.4.10	Types de matériaux en fonte de fer	265	4.10.2	Types de corrosion et leur aspect	303
4.4.11	Comparaison entre la teneur en carbone des aciers et celle des matériaux en acier coulé	267	4.10.3	Mesures de protection anticorrosion	304
4.5	Métaux non ferreux (métaux NF)	268	4.11	Matières plastiques	307
4.5.1	Métaux légers	268	4.11.1	Propriétés et utilisation	307
4.5.2	Métaux lourds	270	4.11.2	Composition chimique et fabrication	308
4.6	Matériaux frittés	273	4.11.3	Classification technologique et structure interne	309
4.6.1	Fabrication de pièces frittées	273	4.11.4	Thermoplastes	310
4.6.2	Propriétés et utilisation	274	4.11.5	Duroplastes	312
4.6.3	Fabrication de matériaux métallurgiques à base de poudre	274	4.11.6	Elastomères	313
4.7	Matériaux en céramique	275	4.11.7	Contrôle des valeurs caractéristiques des matières plastiques	314
4.8	Traitement thermique des aciers	277	4.11.8	Valeurs caractéristiques des principales matières plastiques	315
4.8.1	Types de structure des matériaux ferreux	277	4.11.9	Formage des matières plastiques	316
4.8.2	Diagramme d'état du fer-carbone	278	4.11.10	Transformation ultérieure des produits semi-finis et finis	321
4.8.3	Structure en cas d'augmentation de la température	279	4.12	Matériaux composites	323
4.8.4	Le recuit	280	4.12.1	Structure interne	323
4.8.5	Trempe	281	4.12.2	Matières plastiques renforcées de fibres de verre	324
4.8.6	Trempe et revenu	285	4.12.3	Matériaux composites renforcés par pénétration de particules	325
			4.12.4	Composites stratifiés et structurés	326
			4.13	Problèmes environnementaux causés par les matériaux et les matières auxiliaires	327

5 Technique des machines et des appareils**329**

5.1	Classification des machines	330		automobile	362
5.1.1	Machines motrices	330	5.4.4	Unités fonctionnelles d'une climatisation	363
5.1.2	Machines de travail	334	5.4.5	Dispositifs de sécurité sur des machines	364
5.1.3	Installations de traitement de données	337	5.5	Unités fonctionnelles pour l'assemblage	366
5.1.4	Installations de fabrication	338	5.5.1	Filetage	366
5.2	Manutention dans la fabrication et le montage	339	5.5.2	Assemblages par vis	368
5.2.1	Technique des systèmes de manutention	339	5.5.3	Assemblages par goupilles	376
5.2.2	Installations de fabrication flexibles	347	5.5.4	Assemblages par rivets	378
5.3	Mise en service	353	5.5.5	Liaisons arbre – moyeu	380
5.3.1	Implantation de machines ou d'installations	354	5.6	Unités fonctionnelles d'appui et de soutien	384
5.3.2	Mise en service de machines ou d'installations	355	5.6.1	Frottement et lubrifiants	384
5.3.3	Réception de machines ou d'installations	357	5.6.2	Paliers à glissement	387
5.4	Unités fonctionnelles des machines et appareils	358	5.6.3	Guidages	396
5.4.1	Structure interne de machines	358	5.6.4	Joints d'étanchéité	399
5.4.2	Unités fonctionnelles d'une machine-outil CNC	360	5.6.5	Ressorts	401
5.4.3	Unités fonctionnelles d'un véhicule		5.7	Unités fonctionnelles pour la transmission d'énergie	403
			5.7.1	Arbres et axes	403
			5.7.2	Accouplements	405
			5.7.3	Entraînements par courroie	410

5.7.4	Entraînements par chaîne	412	5.10	Maintenance	440
5.7.5	Entraînements par roues dentées	414	5.10.1	Domaines d'activité et définitions	440
5.8	Unités d'entraînement	417	5.10.2	Termes de la maintenance	441
5.8.1	Moteurs électriques	417	5.10.3	Objectifs de la maintenance	442
5.8.2	Transmission	424	5.10.4	Concepts de maintenance	442
5.8.3	Entraînements pour des mouvements rectilignes (entraînements linéaires)	430	5.10.5	Entretien	445
5.9	Technique de montage	432	5.10.6	Inspection	448
5.9.1	Planification du montage	432	5.10.7	Remise en état	450
5.9.2	Formes d'organisation du montage	433	5.10.8	Améliorations	452
5.9.3	Automatisation du montage	433	5.10.9	Détection des points de perturbation et des sources d'erreur	453
5.9.4	Exemples de montage	434	5.11	Analyse et prévention des dégâts	454
			5.12	Sollicitation et résistance des pièces	456

6 Technique d'automatisation

458

6.1	Commande et réglage	459	6.5.2	Appareils électriques de commutation	507
6.1.1	Bases de la technique de commande	459	6.5.3	Commandes électriques	509
6.1.2	Bases de la technique de régulation	461	6.5.4	Câblage avec des borniers	510
6.2	Bases pour la résolution de tâches de commande	465	6.6	Automates Programmables Industriels (API)	511
6.2.1	Mode de fonctionnement de commandes ..	465	6.6.1	Micro-API	511
6.2.2	Éléments des commandes	466	6.6.2	Automates programmables industriels modulaires (API modulaire)	514
6.2.3	GRAFCET	476	6.7	Commandes CNC	523
6.3	Commandes pneumatiques	479	6.7.1	Caractéristiques des machines à commande numérique	523
6.3.1	Sous-ensembles des installations pneumatiques	479	6.7.2	Coordonnées, points d'origine et de référence	527
6.3.2	Composants pneumatiques	480	6.7.3	Types de commande, corrections	529
6.3.3	Schémas pneumatiques	488	6.7.4	Création de programmes CNC	532
6.3.4	Exemples de commandes pneumatiques ..	489	6.7.5	Cycles et sous-programmes	537
6.3.5	Commandes électropneumatiques	491	6.7.6	Programmation de tours CNC	538
6.4	Commandes hydrauliques	496	6.7.7	Programmation de fraiseuses CNC	546
6.4.1	Éléments	496	6.7.8	Processus de programmation	550
6.4.2	Commandes électro-hydrauliques	504			
6.5	Commandes électriques	507			
6.5.1	Structure	507			

7 Technique de l'information

553

7.1	Communication technique	554	7.2.4	Périphériques	562
7.1.1	Normes et directives	554	7.2.5	Démarrage de l'ordinateur	563
7.1.2	Dessins techniques	555	7.2.6	Le système d'exploitation	564
7.1.3	Représentation des relations techniques ..	556	7.2.7	Virus informatiques	564
7.1.4	Plans et procès-verbaux	556	7.2.8	Logiciels d'application	565
7.2	Technique informatique	558	7.2.9	Incidences économiques et sociales de la technique informatique	567
7.2.1	Mode de fonctionnement des ordinateurs ..	558	7.2.10	Protection du travail sur le poste informatique	568
7.2.2	Matériel	559	7.2.11	Protection des données	568
7.2.3	Affichage des informations sur l'ordinateur	561			

8 Électrotechnique

569

8.1	Le circuit électrique	569	8.3	Types de courant	574
8.1.1	La tension électrique	569	8.4	Puissance électrique et énergie électrique .	575
8.1.2	Le courant électrique	570	8.5	Dispositifs de protection contre les surintensités	576
8.1.3	La résistance électrique	571	8.6	Défaillances sur les installations électriques et mesures de protection	577
8.2	Couplage des résistances	572			
8.2.1	Montage en série de résistances	572			
8.2.2	Montage en parallèle des résistances	573			

Répertoire

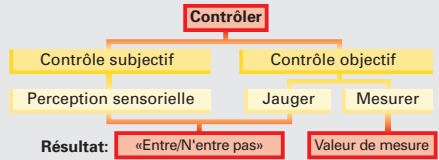
581

Registre des termes techniques

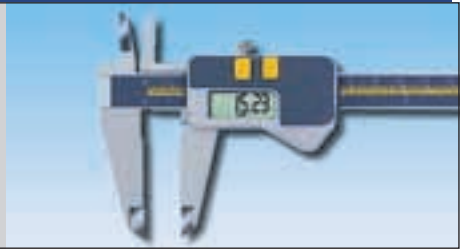
584

1 Métrologie dimensionnelle

1.1	Grandeurs et unités	8
1.2	Bases de la métrologie	10
	Notions de base	10
	Écarts de mesure	13
	Capabilité des moyens de contrôle, surveillance des moyens de contrôle.	16



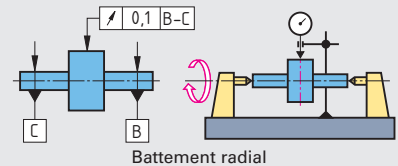
1.3	Moyens de contrôle des longueurs	18
	Règles de mesure, jauges et cales étalon	18
	Instruments de mesure mécaniques et électroniques	21
	Instruments de mesure pneumatiques, électroniques	29
	Instruments de mesure optoélectroniques	32
	Technique multicapteurs dans des instruments de mesure des coordonnées.	34



1.4	Contrôle des états de surfaces	36
	Profil des surfaces	36
	Paramètres ; procédés de contrôle des surfaces. .	37
1.5	Tolérances et ajustements	40
	Tolérances.	40
	Ajustements	44

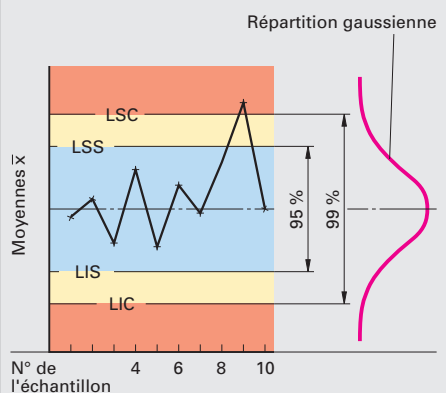


1.6	Contrôle de la forme et de la position	48
	Tolérances de forme et de position	48
	Contrôle des surfaces planes et inclinées	50
	Contrôle de la circularité, de la coaxialité et du battement	53
	Contrôle des filetages ; contrôle de la conicité . .	58



2 Management de la qualité

2.1	Domaines de travail du MQ	61
2.2	La série de normes supprimer EN ISO 9000 . . .	62
2.3	Exigences de qualité	62
2.4	Caractéristiques de qualité et défauts	63
2.5	Outils du management de la qualité	64
2.6	Maîtrise de la qualité	67
2.7	Assurance de la qualité	68
2.8	Capabilité des procédés	72
2.9	Performance des procédés	75
2.10	Maîtrise statistique des procédés au moyen de contrôle de la qualité	76
2.11	Audit et certification	79
2.12	Processus d'amélioration continu : les collaborateurs optimisent les procédés . . .	80



1 Métrologie dimensionnelle

1.1 Grandeurs et unités

Les grandeurs décrivent des caractéristiques, par ex. la longueur, le temps, la température ou l'intensité du courant (**fig. 1**).

Les grandeurs et unités de base sont définies dans le système international d'unités **SI** (System International) (**tableau n° 1**).

Pour éviter les nombres très grands ou très petits, on fait précéder le nom des unités par des multiples de dix ou de sous-multiples de dix, par ex. millimètre (**tableau n° 2**).

■ Longueur

L'unité de base de la longueur est le mètre. Un mètre est la longueur de la distance que la lumière parcourt dans l'espace vide d'air dans un 299 792 458^e de seconde.

Quelques préfixes combinés avec l'unité « mètre » utilisés couramment permettent d'indiquer d'une manière pratique les grandes distances ou les petites longueurs (**tableau n° 3**).

Parallèlement au système métrique, le système anglo-saxon de mesure de la longueur en pouces (inch) est encore utilisé dans quelques pays.

Conversion : 1 pouce (in) = 25,4 mm

■ Angles

Les unités de mesure de l'angle désignent les angles au centre qui se rapportent au cercle entier.

Un **degré (1°)** est la fraction 1/360 de l'angle plein (**fig. 2**). La subdivision de 1° peut être effectuée en minutes ('), secondes (") ou en sous-multiples de dix.

Le **radian (rad)** est l'angle qui, sur un cercle dont le rayon est de 1 m, intercepte un arc de 1 m de longueur (**fig 2**). Un radian correspond à un angle de 57,295 779 51°.

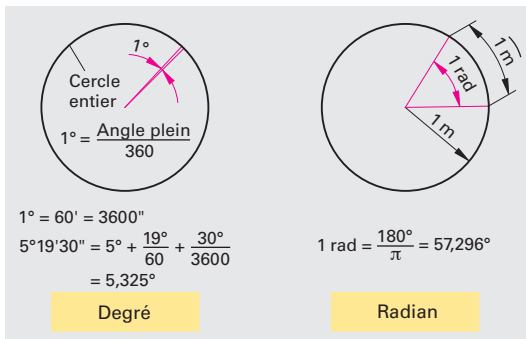


Fig. 2 : Unités angulaires

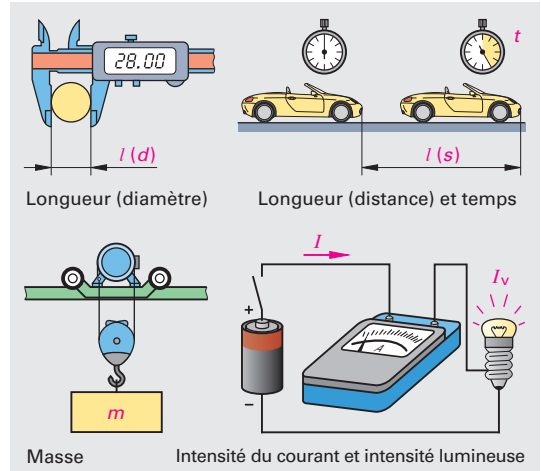


Fig. 1 : Grandeurs de base

Tableau n° 1 : Système international d'unités

Grandeurs de base et symboles	Unités de base	
	Nom	Abréviation
Longueur l	mètre	m
Masse m	kilogramme	kg
Temps t	seconde	s
Température thermodynamique T	kelvin	K
Intensité du courant I	ampère	A
Intensité lumineuse I_v	candela	cd

Tableau n° 2 : Préfixes permettant de désigner les multiples et sous-multiples de dix des unités

Préfixe	Facteur
M méga	multiplié par un million $10^6 = 1\,000\,000$
k kilo	multiplié par mille $10^3 = 1\,000$
h hecto	multiplié par cent $10^2 = 100$
da déca	multiplié par dix $10^1 = 10$
d déci	divisé par dix $10^{-1} = 0,1$
c centi	divisé par cent $10^{-2} = 0,01$
m milli	divisé par mille $10^{-3} = 0,001$
μ micro	divisé par un million $10^{-6} = 0,000\,001$

Tableau n° 3 : Unités de longueur courantes

Système métrique	
1 kilomètre (km)	= 1 000 m
1 décimètre (dm)	= 0,1 m
1 centimètre (cm)	= 0,01 m
1 millimètre (mm)	= 0,001 m
1 micromètre (μm)	= 0,000 001 m = 0,001 mm
1 nanomètre (nm)	= 0,000 000 001 m = 0,001 μm

■ Masse, force et pression

La **m** **masse** d'un corps est dépendante de sa quantité de matière. Elle est indépendante du lieu où le corps se trouve. L'unité de base de la masse est le kilogramme. Le gramme et la tonne sont également des unités courantes : $1\text{ g} = 0,001\text{ kg}$, $1\text{ t} = 1\,000\text{ kg}$.

Un cylindre en platine iridié qui est conservé à Paris est l'étalon international pour la masse de 1 kg . Il s'agit de la seule unité de base qui, jusqu'à présent, n'a pas encore pu être définie par une constante naturelle.

Un corps dont la masse est d'un kilogramme agit sur la terre (lieu normalisé Zurich) avec une **force** F_G (force de gravité) de $9,81\text{ N}$ sur sa suspension ou son appui (**fig. 1**).

La **pression** p désigne la force par unité de surface (**fig. 2**) en pascals (Pa) ou en bars (bar) dans un fluide.

Unités : $1\text{ Pa} = 1\text{ N/m}^2 = 0,00001\text{ bar}$; $1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa} = 10\text{ N/cm}^2$

■ Température

La température décrit l'état thermique de corps, de liquides ou de gaz. Le **kelvin (K)** est la fraction $1/273,15$ de la différence de température entre le point zéro absolu et le point de fusion de la glace (**fig. 3**). L'unité la plus courante de température est le **degré Celsius (°C)**. Le point de fusion de la glace correspond à 0 °C , le point d'ébullition de l'eau est de 100 °C .

Conversion : $0\text{ °C} = 273,15\text{ K}$; $0\text{ K} = -273,15\text{ °C}$

■ Temps, fréquence et fréquence de rotation

L'unité de base définie pour le **temps** t est la seconde (s).

Unités : $1\text{ s} = 1\,000\text{ ms}$; $1\text{ h} = 60\text{ min} = 3\,600\text{ s}$

La **durée de la période** T , appelée aussi « durée d'oscillation », est le temps en secondes pendant lequel un processus est répété régulièrement, par ex. l'oscillation complète d'un pendule ou la rotation d'une meule (**fig. 4**).

La **fréquence** f est la valeur inverse de la durée de la période T ($f = 1/T$). Elle indique le nombre de processus ayant lieu par seconde. Elle est indiquée en $1/\text{s}$ ou en hertz (Hz).

Unités : $1/\text{s} = 1\text{ Hz}$; $10^3\text{ Hz} = 1\text{ kHz}$; $10^6\text{ Hz} = 1\text{ MHz}$

La **fréquence de rotation** n (**régime**) est le nombre de tours effectuées par seconde ou par minute.

Exemple : Une meule d'un diamètre de 200 mm exécute $6\,000$ tours en 2 min .

Quel est son régime ?

Solution : Fréquence de rotation (régime) $n = \frac{6\,000}{2\text{ min}} = 3\,000/\text{min}$

■ Formules

Les formules établissent des rapports entre les grandeurs.

Exemple : La pression p est la force F par surface A .

$$p = \frac{F}{A}; \quad p = \frac{100\text{ N}}{1\text{ cm}^2} = 100 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} = 10\text{ bars}$$

Dans les formules les grandeurs sont exprimées par des symboles. La valeur de la grandeur est indiquée comme produit de la valeur numérique et de l'unité, par ex. $F = 100\text{ N}$ ou $A = 1\text{ cm}^2$. Les équations d'unités indiquent le rapport entre les unités, par ex. $1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa}$.

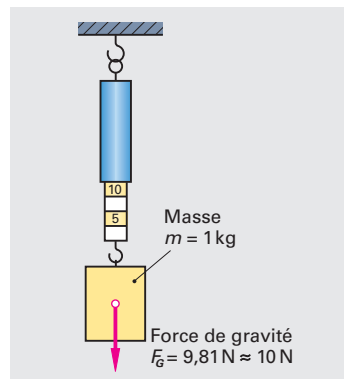


Fig. 1 : Masse et force

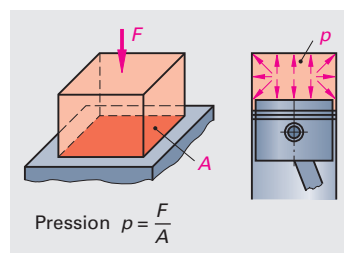


Fig. 2 : Pression

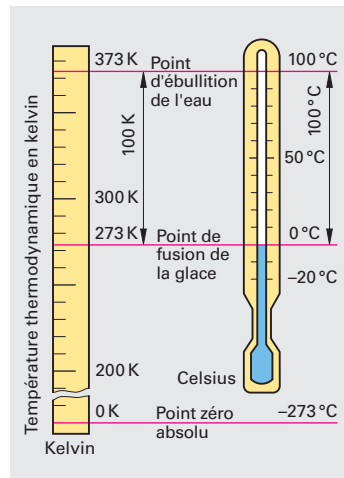


Fig. 3 : Échelles de température

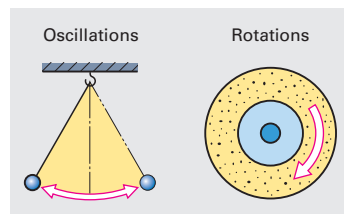


Fig. 4 : Processus périodiques

1.2 Bases de la métrologie

1.2.1 Notions de base

Lors du contrôle, des caractéristiques existantes des produits telles que les dimensions, la forme ou l'état de surface sont comparés avec les propriétés exigées.

Le contrôle d'un objet permet de constater s'il présente les caractéristiques exigées, par ex. les dimensions, la forme ou l'état de surface.

■ Types de contrôle

Le **contrôle subjectif** est effectué via la perception sensorielle du contrôleur sans appareils auxiliaires (fig. 1). Il constate par ex. si l'ébavurage et la rugosité de la pièce sont admissibles (contrôle visuel et tactile).

Le **contrôle objectif** est effectué avec des moyens de contrôle, c'est-à-dire avec des instruments de mesure et des jauges (fig. 1 et n° 2).

Mesurer consiste à vérifier une longueur ou un angle au moyen d'un instrument de mesure. Le résultat est une valeur de mesure.

Jauger signifie « comparer un objet à une jauge ». Cela ne permet pas d'obtenir une valeur numérique, mais seulement de constater si l'objet contrôlé est bon ou doit être mis au rebut.

■ Moyens de contrôle

Les moyens de contrôle sont divisés en trois groupes : **les instruments de mesure, les jauges et les moyens auxiliaires**.

Tous les instruments de mesure et les jauges sont basés sur une **mesure matérialisée**. Elle représente la grandeur de mesure, par ex. par la distance entre des traits (règle), la distance fixe entre des surfaces (cale étalon, jauge) ou l'orientation de surfaces (cale étalon angulaire).

Les **instruments de mesure à affichage** ont des marques mobiles (aiguilles, graduation vernier), des échelles mobiles ou des compteurs. La valeur de mesure peut être lue directement.

Les **jauges** matérialisent soit la dimension, soit la dimension **et** la forme de l'objet à contrôler.

Les **moyens auxiliaires** sont par ex. des supports de mesure et des prismes.

■ Notions techniques de mesure

Afin d'éviter les malentendus lors de la description des opérations de mesure ou des processus d'analyse, il est indispensable d'utiliser des notions de base sans équivoque (**tableaux, pages 11 et 12**).

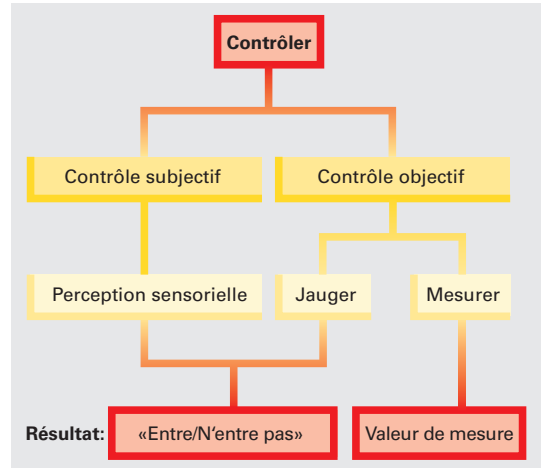


Fig. 1 : Types de contrôle et résultat du contrôle

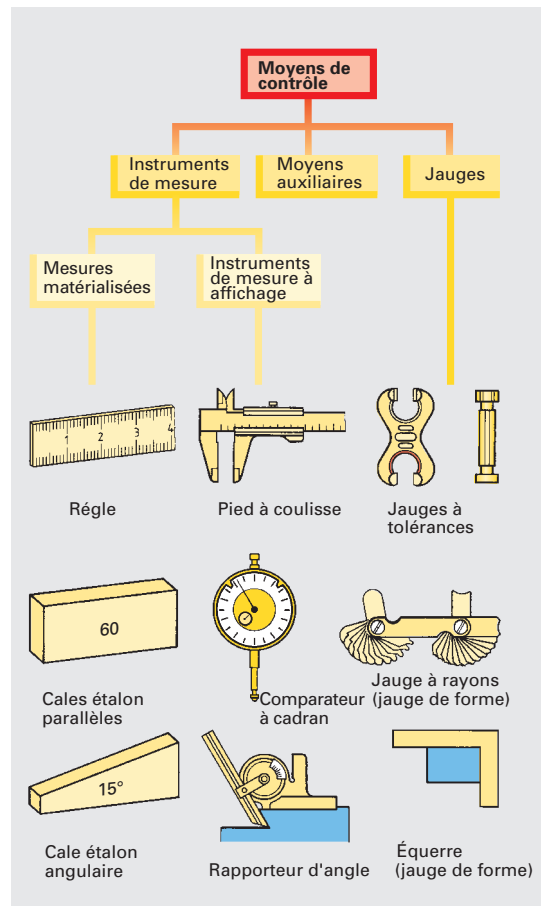
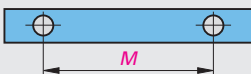




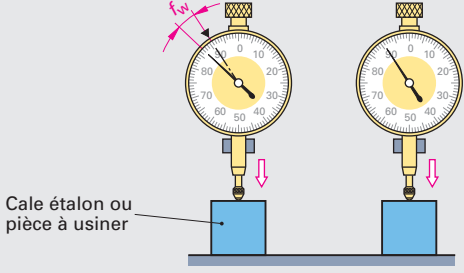
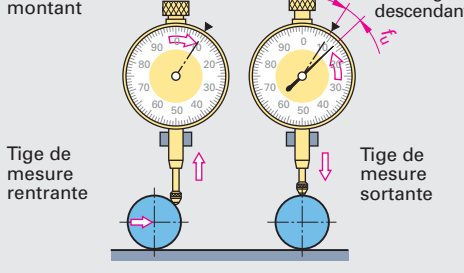
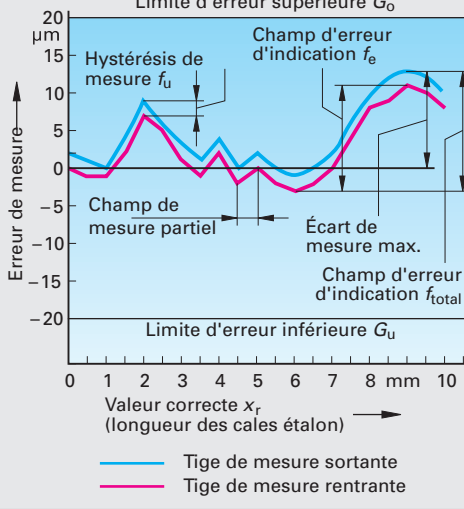
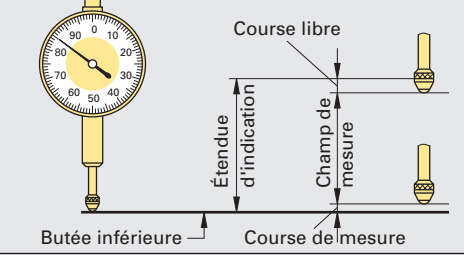
Fig. 2 : Moyens de contrôle

Tableau n° 1 : Notions techniques de mesure

Terme	Abré- viation	Définition, explication	Exemple, formules
Le mesurande	M	Grandeur physique soumise à un mesurage, par ex. un diamètre ou la distance mesurée entre des alésages.	
Indication	—	La valeur numérique affichée de la valeur de mesure sans unité (en fonction de l'étendue de la mesure). En cas de mesures matérialisées, l'inscription correspond à l'affichage.	 Échelle de mesure $Skw=0,01mm$  Affichage numérique $Zw=0,01mm$
Indication de l'échelle	—	Affichage continu sur une échelle avec repères	
Indication numérique	—	Affichage numérique sur une échelle à chiffres	
Valeur d'une division*	Skw ou → ←	La valeur d'une division est égale à la différence entre les valeurs de mesure correspondant à deux repères consécutifs. La division Skw est indiqué dans l'unité figurant sur l'échelle.	
Pas (échelon) numérique	Zw	Correspond au pas d'une échelle numérique.	
Valeur mesurée	x_a $x_1, x_2 \dots$	La valeur mesurée est affichée par un instrument, elle est composée de la valeur vraie et des écarts de mesure aléatoires et systématiques.	
Moyenne	\bar{x}	La moyenne \bar{x} résulte en général de cinq mesures répétitives.	
Valeur vraie	x_w	La valeur vraie ne pourrait être obtenue que par un mesurage idéal. La valeur vraie x_w est une « évaluation » déterminée à l'issue de nombreux mesurages répétitifs et corrigée des écarts systématiques connus.	
Valeur correcte	x_r	Pour les mesures matérialisées, la valeur correcte x_r est déterminée par étalonnage. Le plus souvent, elle diffère d'une manière négligeable de la valeur vraie. Lors d'un mesurage par comparaison, par ex. avec une cale étalon, sa mesure peut être considérée comme la valeur correcte.	
Résultat de mesure non corrigé	x_a $x_1, x_2 \dots$ \bar{x}	La valeur mesurée d'un mesurande, par ex. une valeur de mesure unique non corrigée ou une valeur de mesure déterminée par des mesurages répétitifs qui n'a pas encore été corrigée des écarts systématiques A_s . Dans la technique de production, des mesurages uniques sont majoritairement effectués en raison d'écarts dont on a eu connaissance à l'occasion d'anciennes séries de mesure ou examens de capabilité. Le résultat de la mesure reste peu fiable en cas de mesure unique en raison des écarts de mesure aléatoires ainsi qu'en raison des écarts de mesure systématiques inconnus.	
Écart de mesure systématique	A_s	L'écart de mesure résulte de la comparaison de la valeur mesurée x_a ou de la moyenne \bar{x}_a avec la valeur correcte x_r (page 15).	$A_s = x_a - x_r \quad (A_s = \bar{x}_a - x_r)$
Valeur de correction	K	Compensation d'écarts systématiques connus, par ex. écart de température	$K = -A_s \quad (K = K_1 + K_2 \dots + K_n)$
Incertitude de mesure*	u	L'incertitude de mesure comporte tous les écarts aléatoires ainsi que les écarts de mesure systématiques inconnus et non corrigés.	$u_c = \sqrt{u_{x1}^2 + u_{x2}^2 + \dots + u_{xn}^2}$ $U = 2 \cdot u_c$ (facteur 2 pour un niveau de confiance de 95 %)
Incertitude standard combinée	u_c	Effet global de nombreux éléments d'incertitude inhérents à la dispersion de valeurs mesurées, par ex. en rapport avec la température, le dispositif de mesure, le contrôleur et le procédé de mesurage.	
Incertitude de mesure élargie	U	L'incertitude élargie indique la plage $y - U$ à $y + U$ autour du résultat de mesure dans laquelle on attend la « valeur vraie » d'une grandeur de mesure.	
Résultat de mesure corrigé	y	Valeur de mesure, corrigée d'écarts de mesure systématiques connus (K – correction)	$y = x + K \quad (y = \bar{x} + K)$
Résultat de mesure complet	Y	Le résultat de la mesure Y est la valeur vraie pour le mesurande M. Il inclut l'incertitude de mesure élargie U.	$Y = y \pm U \quad (y = \bar{x} + K \pm U)$

* Caractéristiques d'instruments de mesure qui sont indiquées dans les catalogues.

Tableau n° 1 : Notions techniques de mesure

Notion	Abré- viation	Définition, explication	Exemple :
Fidélité (répétabilité)* Fidélité* (répétabilité) Limite	f_w r	<p>La précision de répétition d'un instrument de mesure est sa capacité à atteindre des affichages proches les uns des autres pour, le plus souvent, 5 mesurages du même mesurande dans le même sens de mesure et dans les mêmes conditions de mesure. Plus la dispersion est petite, plus le procédé de mesure fonctionne avec précision.</p> <p>La limite de répétition est la différence pour deux valeurs de mesurages uniques alors que la probabilité est de 95 %.</p>	 <p>Cale étalon ou pièce à usiner</p>
Hystérésis de mesure*	f_u	<p>L'hystérésis de mesure d'un instrument de mesure est la différence d'affichage pour le même mesurande si la mesure est faite une fois alors que l'affichage croît (lorsque la tige de mesure rentre) et une fois alors que l'affichage décroît (lorsque la tige de mesure sort).</p> <p>L'hystérésis de mesure peut être déterminée par différentes mesures pour des valeurs quelconques sur l'étendue de la mesure, ou être consultée dans le diagramme du champ d'erreur.</p>	 <p>Affichage montant</p> <p>Affichage descendant</p> <p>Tige de mesure rentrante</p> <p>Tige de mesure sortante</p>
Champ d'erreur d'indication* Champ d'erreur d'indication total	f_e f_{total}	<p>Le champ d'erreur d'indication f_e est la différence entre le plus grand et le plus petit écart de mesure sur toute l'étendue de la mesure. Pour les comparateurs à cadran, il est déterminé alors que la tige de mesure rentre.</p> <p>Le champ de déviation globale f_{total} de comparateurs à cadran est déterminé par des mesures sur toute l'étendue de la mesure alors que la tige de mesure rentre ou sort.</p>	 <p>Limite d'erreur supérieure G_o</p> <p>Erreur de mesure</p> <p>Hystérésis de mesure f_u</p> <p>Champ d'erreur d'indication f_e</p> <p>Champ de mesure partiel</p> <p>Écart de mesure max.</p> <p>Champ d'erreur d'indication f_{total}</p> <p>Limite d'erreur inférieure G_u</p> <p>Valeur correcte x_r (longueur des cales étalon)</p> <p>Tige de mesure sortante</p> <p>Tige de mesure rentrante</p>
Erreurs maximales tolérées*	G	<p>Les limites d'erreur sont les montants d'écart tolérés ou indiqués par le fabricant pour les écarts de mesure d'un instrument de mesure. Si ces montants sont dépassés, les écarts sont des erreurs. Si les écarts limite supérieur et inférieur sont égaux, la valeur indiquée pour chacun des deux écarts de limite est valable, par ex. $G_o = G_u = 20 \mu m$</p>	
Étendue de mesure*	Meb	<p>L'étendue de mesure est la plage de valeurs mesurées dans laquelle les limites d'erreur de l'instrument de mesure ne sont pas dépassées.</p>	
Champ de mesure	Mes	<p>Le champ de mesure est la différence entre la valeur finale et la valeur initiale de l'étendue de la mesure.</p>	
Étendue d'indication	Az	<p>L'étendue d'indication est comprise entre la plus grande et la plus petite valeur d'un instrument de mesure.</p>	 <p>Course libre</p> <p>Étendue d'indication</p> <p>Champ de mesure</p> <p>Butée inférieure</p> <p>Course de mesure</p>

* Caractéristiques d'instruments de mesure qui sont indiquées dans les catalogues.

1.2.2 Écarts de mesure

■ Causes des écarts de mesure

(tableau n° 1, page 14)

L'**écart à la température de référence** de 20 °C cause toujours des écarts de mesure lorsque les pièces, les instruments de mesure et les jauges utilisés pour effectuer le contrôle n'ont pas été fabriqués avec le même matériau et ont des températures différentes (fig. 1).

En cas d'augmentation de la température de 4 °C d'une cale étalon en acier de 100 mm de longueur, par ex. en raison de la chaleur de la main, on peut observer une modification de la longueur de 4,6 µm.

À la **température de référence de 20°C**, les pièces, instruments de mesure et jauges doivent être dans les tolérances prescrites.

La **déformation dues à la force de mesure** apparaissent sur des pièces, instruments de mesure et supports de comparateur flexibles.

La déformation élastique d'un support de comparateur reste sans effet sur la valeur de mesure quand, pendant la mesure, la force de mesure est la même que lors de la mise à zéro avec des cales étalon (fig. 2).

Pour réduire les écarts de mesure, il faut que l'affichage d'un instrument de mesure soit réglé dans les conditions dans lesquelles les pièces sont mesurées.

Les **écarts de mesure dus à la parallaxe** apparaissent lorsque la lecture est effectuée sous un angle oblique (fig. 3).

■ Types d'écarts

Les **écarts de mesure systématiques** sont causés par des déviations constantes : la température, la force de mesure, le rayon du palpeur de mesure ou des échelles imprécises.

Les **écarts de mesure aléatoires** ne peuvent pas être déterminés ni en valeur ni en signe. Les causes peuvent être par ex. des fluctuations inconnues de la force de mesure et de la température.

Les **écarts de mesure systématiques** faussent la valeur de mesure. Si la grandeur et le signe (+ ou -) des écarts sont connus, ils peuvent être compensés.

Les **écarts de mesure aléatoires** rendent la valeur de mesure incertaine. Les écarts aléatoires inconnus ne peuvent pas être compensés.

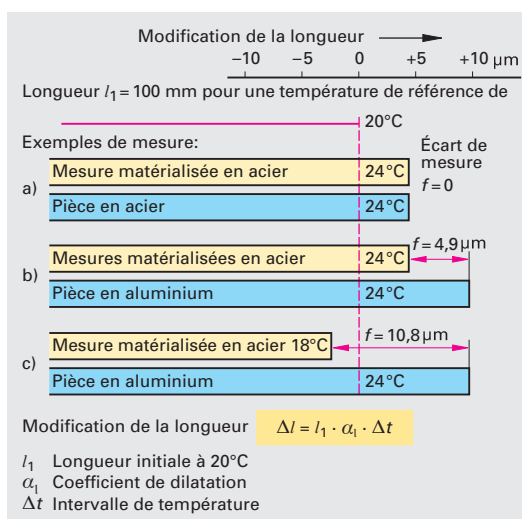


Fig. 1 : Écarts de mesure résultant de la température

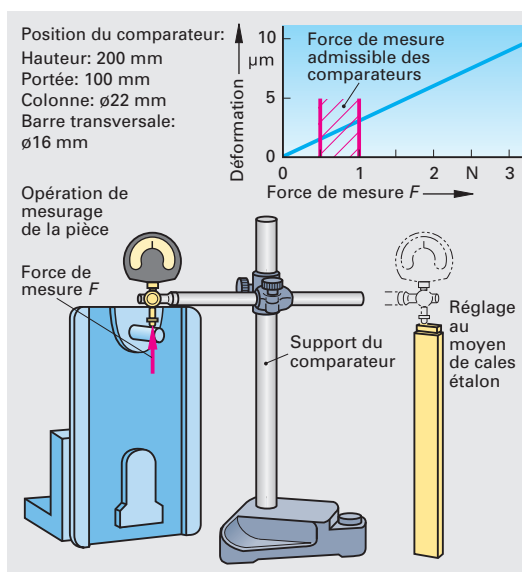


Fig. 2 : Écarts de mesure consécutifs à une déformation élastique sur le support du comparateur, résultant de la force de mesure

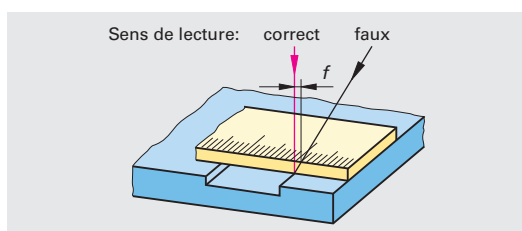
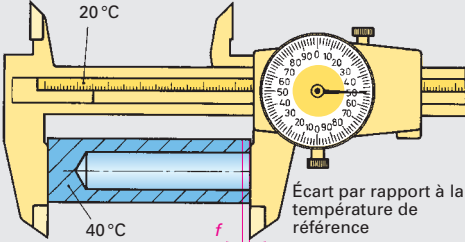
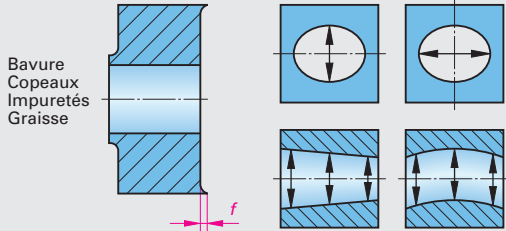
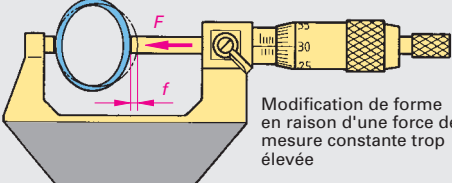
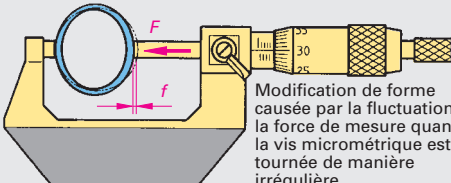
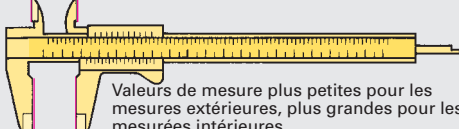
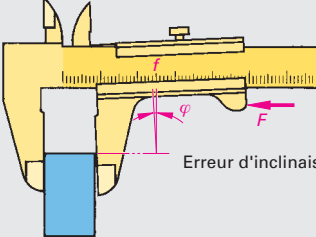
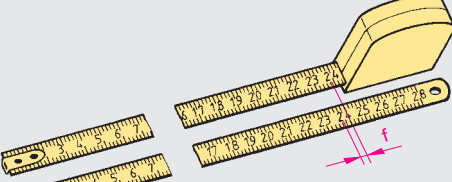
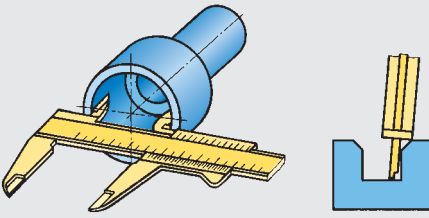
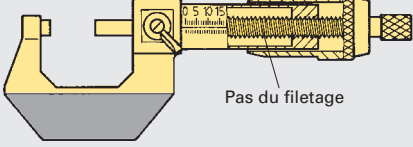
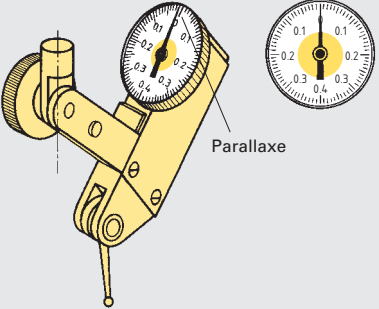
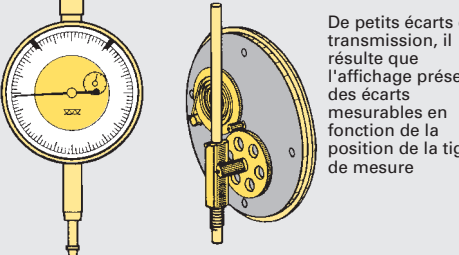


Fig. 3 : Écart de mesure dû à la parallaxe

Tableau n° 1 : Causes et types d'écarts de mesure

Écarts de mesure systématiques	Écarts de mesure aléatoires
 <p>20 °C</p> <p>40 °C</p> <p>Écart par rapport à la température de référence</p> <p>Valeur de mesure trop grande en raison d'une température trop élevée de la pièce</p>	 <p>Bavure Copeaux Impuretés Graisse</p> <p>Incertitudes causées par des surfaces souillées et des variations des forme</p>
 <p>Modification de forme en raison d'une force de mesure constante trop élevée</p> <p>Valeur de mesure trop petite sous l'influence de la force de mesure</p>	 <p>Modification de forme causée par la fluctuation de la force de mesure quand la vis micrométrique est tournée de manière irrégulière</p> <p>Dispersion des valeurs de mesure causée par la fluctuation de la force de mesure</p>
 <p>Valeurs de mesure plus petites pour les mesures extérieures, plus grandes pour les mesurées intérieures</p> <p>Écarts de mesure causés par l'usure des surfaces de mesure</p>	 <p>Erreur d'inclinaison</p> <p>«Erreur d'inclinaison» dépendant de la force de mesure et du jeu dans le coulisseau</p>
 <p>Différences entre les valeurs mesurées sur les règles de mesure</p>	 <p>Positionnement incertain du pied à coulisse lors de mesures intérieures</p>
 <p>Pas du filetage</p> <p>Influence des fluctuations de pas sur les valeurs de mesure</p>	 <p>Parallaxe</p> <p>Erreur de lecture par angle de vue oblique (parallaxe)</p>
 <p>De petits écarts de transmission, il résulte que l'affichage présente des écarts mesurables en fonction de la position de la tige de mesure</p> <p>Transmission irrégulière du mouvement de la tige de mesure</p>	

Les écarts systématiques peuvent être constatés par un **mesurage comparatif** avec des instruments de mesure ou des cales étalon précises.

L'affichage est comparé avec une cale étalon sur l'exemple du contrôle d'un micromètre (fig. 1). La valeur nominale des cales étalon (inscription) peut être considérée comme la valeur correcte. L'écart systématique A_s d'une valeur de mesure individuelle résulte de la différence de la valeur mesurée x_a et de la valeur correcte x_r .

Si l'on contrôle les écarts de mesure d'un micromètre d'extérieur sur l'étendue d'indication de 0 mm à 25 mm, on obtient le diagramme des écarts de mesure (fig. 1). Pour les micromètres, la mesure comparative est effectuée avec des cales étalons définies pour différents angles de rotation de la vis micrométrique.

Limites d'erreur et tolérances

- L'erreur maximale G ne doit être dépassée à aucun endroit de l'étendue de mesure.
- En métrologie, les limites d'erreur symétriques sont le cas normal. Les erreurs maximales tolérées contiennent les écarts de l'élément de mesure, par ex. les écarts de planéité.
- Le respect de l'erreur maximale G peut être contrôlé au moyen de cales étalon parallèles de la classe de tolérance 1 selon DIN EN ISO 3650.

On obtient la réduction d'écarts systématiques de mesure par la **mise à zéro de l'affichage** (fig. 2). La mise à zéro est effectuée avec des cales étalon qui correspondent à la cote de contrôle sur la pièce. La dispersion aléatoire peut être déterminée par des **mesures effectuées dans des conditions de répétabilité** (fig. 3) :

Règles de travail pour les mesures effectuées dans des conditions de répétabilité

- Les mesures répétées de la même grandeur de mesure sur la même pièce doivent être effectuées à la suite les unes des autres.
- Le dispositif de mesure, le procédé de mesure, le contrôleur et les conditions environnementales doivent rester les mêmes pendant la nouvelle mesure.
- Pour éviter que des écarts de circularité influencent la dispersion de la mesure, il convient de mesurer toujours au même endroit.

Les écarts de mesure systématiques sont constatés par une mesure comparative.

Les écarts aléatoires peuvent être déterminés par des mesures répétitives.

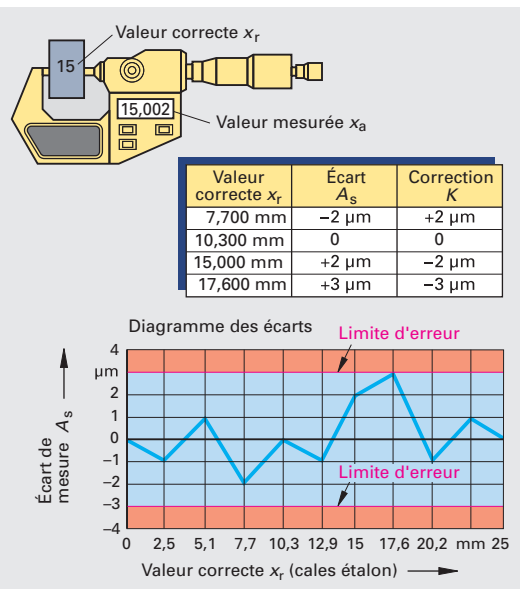


Fig. 1 : Écarts systématiques d'un micromètre d'extérieur

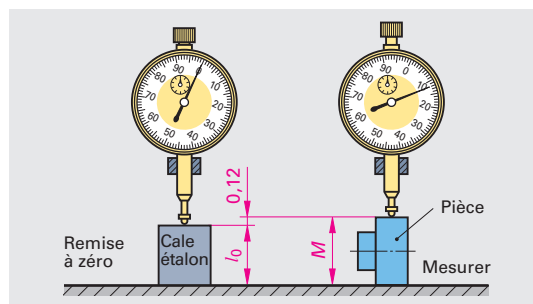


Fig. 2 : Mise à zéro de l'affichage et mesure par comparaison

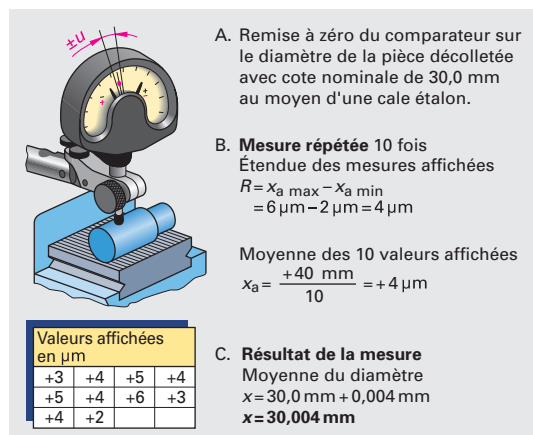


Fig. 3 : Écarts aléatoires d'un comparateur pour les mesures effectuées dans des conditions de répétabilité

1.2.3 Capabilité des moyens de contrôle et surveillance des moyens de contrôle

■ Capabilité des moyens de mesure

La sélection de moyens de mesure dépend des conditions de mesure au lieu d'utilisation et de la tolérance donnée par les spécifications du contrôle, par ex. la longueur, le diamètre ou la circularité. Le nombre de contrôleurs est également important étant donné que, par ex., l'incertitude de mesure générale augmente en cas de travail en équipe avec des contrôleurs différents pour les mêmes pièces.

Les moyens de mesure sont considérés comme fiables (correspondant aux exigences de capabilité) si l'incertitude de mesure est au maximum égale à 10% de la tolérance de mesure ou de forme.

Incrtitude de mesure $U_{adm} = 1/10 \cdot T$ (fig. 1)

Les procédés de mesure avec une incertitude considérablement inférieure à $1/10 \cdot T$ sont certes appropriés, mais trop onéreux. D'une incertitude de mesure plus importante, il résulterait que trop de pièces ne sont plus reconnues sans équivoque comme « entre » ou « n'entre pas », étant donné que le nombre de valeurs de mesure situées sur l'étendue de l'incertitude de mesure U serait plus grand (fig. 2). La zone de conformité est d'autant plus grande que l'incertitude de mesure U est petite.

Si les valeurs de mesure se trouvent dans la zone de conformité, la validité de la mesure avec la tolérance est garantie.

Exemple des conséquences d'une incertitude de mesure trop importante $U = 0,2 \cdot T$ (fig. 2) : bien que la valeur de mesure correcte 15,005 mm se trouve hors de la tolérance, la valeur de mesure 15,012 mm est affichée en raison d'un écart de mesure de + 7 µm, mesure qui semble se trouver dans les limites de la tolérance. Dans ces conditions, une pièce devant être mise au rebut n'est pas reconnue. Inversement, une mesure dans les limites de la tolérance peut entraîner l'affichage d'une valeur mesurée située hors des limites de tolérance en raison d'un écart de mesure. Dans ce cas, une bonne pièce serait mise au rebut de manière erronée.

L'évaluation de la capabilité des moyens de mesure est possible de manière approximative si l'incertitude de mesure prévisionnelle est connue (tableau n° 1).

Dans les conditions de l'atelier, l'incertitude de mesure correspond, pour des instruments mécaniques de mesure manuelle neufs ou presque neufs, à environ une division (1 Skw) et, pour des appareils électroniques, à trois échelons environ (3 Zw).

Les instruments de mesure pour la fabrication sont sélectionnés de manière à rendre l'incertitude de mesure U négligeable par rapport à la tolérance de la pièce. Cela permet d'obtenir une valeur de mesure affichée ayant valeur de résultat de la mesure.

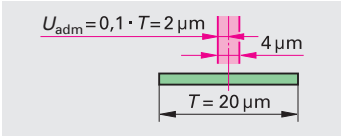


Fig. 1 : Incrtitude de mesure admissible

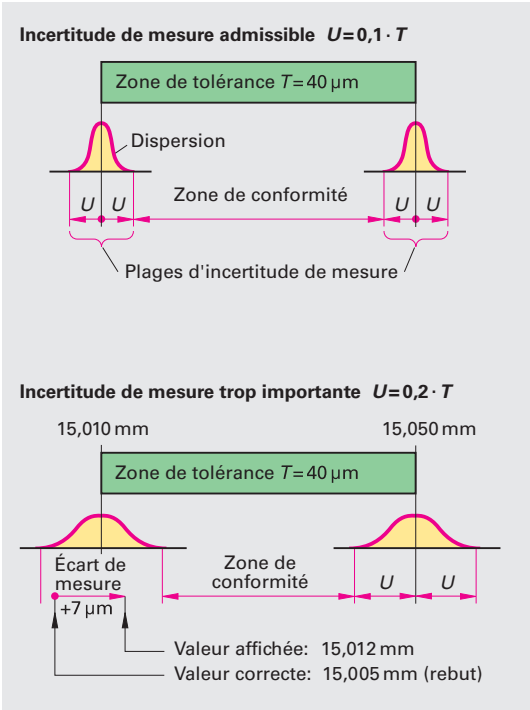
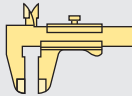
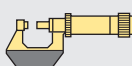



Fig. 2 : Incrtitude de mesure par rapport à la tolérance

Tableau n° 1 : Incrtitude de mesure		
Instrument de mesure	Incrtitude de mesure prévisionnelle	Erreur maximale tolérée G des nouveaux instruments de mesure
 Skw = 0,05 mm Étendue de la mesure : 0 ... 150 mm	$U \geq 50 \mu\text{m}$	50 µm
 Skw = 0,01 mm Étendue de la mesure : 50 ... 75 mm	$U \approx 10 \mu\text{m}$	5 µm
 Skw = 1 µm Étendue de la mesure : ± 50 µm	$U \approx 1 \mu\text{m}$	1 µm

■ Capacité des moyens de mesure pour une tolérance donnée

Exemple : Un diamètre dont les dimensions limites sont de 20,40 mm et 20,45 mm doit être mesuré avec un micromètre ($Skw = 0,01$ mm). Il s'agit d'évaluer la capacité des moyens de mesure (aptitude) du micromètre en fonction de l'incertitude de mesure attendue et de la tolérance donnée.

Solution : L'incertitude de mesure correspond approximativement à 1 pas de graduation (0,01 mm). En raison de cette incertitude de mesure, la valeur de mesure correcte peut être comprise entre 20,44 mm et 20,46 mm pour l'affichage 20,45 mm.

Incertitude de mesure attendue du micromètre : $U = 0,01$ mm

Incertitude de mesure admissible : $U_{adm} = 0,1 \cdot T = 0,1 \cdot 0,05 \text{ mm} = 0,005 \text{ mm}$

Le micromètre d'extérieur n'est pas adapté pour la tolérance donnée car l'incertitude de mesure prévisionnelle est trop grande. Des comparateurs à cadran ou des palpeurs électroniques peuvent être recommandés car ces instruments de mesure présentent un degré de précision supérieur, la dispersion de leurs valeurs de mesure étant moindre.

■ Surveillance des moyens de contrôle

Sur des instruments de mesure avec affichage, l'étalement permet de constater l'écart de mesure systématique entre l'affichage et la valeur correcte. Pour ce faire, il convient d'effectuer une comparaison avec des cales étalon ou des instruments de mesure de précision élevée. Les écarts déterminés sont documentés sur une fiche d'étalement et éventuellement dans des diagrammes d'écart (fig. 1, page 15).

L'étalonnage est confirmé par un autocollant de contrôle spécial qui indique la date du contrôle suivant (fig. 1).

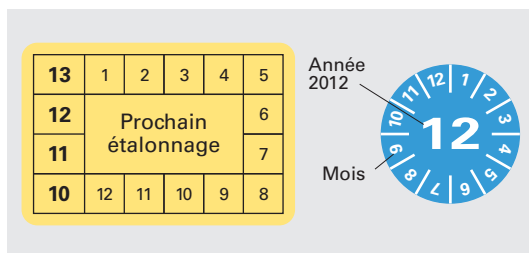


Fig. 1 : Autocollant pour les instruments de mesure étalonnés

Calibrer un instrument de mesure, expression réservée aux Bureaux de vérification des poids et mesures.

Étalonner un instrument de mesure, permet de définir l'écart par rapport à la valeur correcte. Un certificat d'étalonnage est établi.

Ajuster un instrument de mesure, permet de réduire au minimum les écarts de mesure.

Régler signifie que l'affichage est fixé sur une certaine valeur, par ex. mise à zéro.

Répétition et approfondissement des connaissances

- 1 Quel est l'effet d'écarts de mesure systématiques et aléatoires sur le résultat de la mesure ?
- 2 Comment peut-on déterminer les écarts de mesure systématiques d'un micromètre ?
- 3 Pourquoi la mesure de pièces à paroi mince pose-t-elle des problèmes ?
- 4 Pourquoi des écarts de mesure peuvent-ils résulter du fait que la température de référence n'est pas respectée sur des instruments de mesure et des pièces ?
- 5 À quoi peut-on probablement attribuer les écarts systématiques sur des micromètres ?
- 6 Lorsqu'une mesure est effectuée en atelier, pourquoi la valeur de mesure affichée est-elle considérée comme résultat de mesure, tandis que la valeur affichée est souvent corrigée dans un laboratoire de mesure ?
- 7 Quels sont les avantages de la mesure différentielle et de la mise à zéro sur les comparateurs à cadran ?
- 8 Pourquoi est-il particulièrement problématique du point de vue de la métrologie de s'écarter de la température de référence sur des pièces en aluminium ?
- 9 De combien la longueur d'une cale étalon parallèle ($l = 100$ mm, $a = 0,000\,016$ 1/°C) est-elle modifiée si sa température est augmentée de 20 °C à 25 °C par la chaleur de la main ?
- 10 Quel pourcentage maximal de la tolérance de la pièce les écarts de mesure peuvent-ils atteindre pour pouvoir être considérés comme négligeables lors du contrôle ?
- 11 À quelle incertitude de mesure faut-il s'attendre sur un comparateur à écran mécanique ($Skw = 0,01$ mm) ?

1.3 Moyens de contrôle des longueurs

1.3.1 Règles de mesure, règles à filament, cales étalons d'angles, jauges et cales étalon

■ Règles de mesure, règles, rapporteurs d'angles

Les **règles graduées** matérialisent la cote de longueur par l'intervalle entre les divisions. La précision de la graduation s'exprime dans les limites d'erreur des échelles de mesure (**tableau n° 1**). Des erreurs de mesure apparaissent lorsque la limite d'erreur supérieure G_o d'une échelle de mesure est dépassée vers le haut ou lorsque la limite d'erreur inférieure G_u est dépassée vers le bas.

Les **règles de mesure pour les capteurs de position**, par ex. en verre ou en acier, fonctionnent selon le principe de détection photoélectronique. Les cellules photosensibles génèrent un signal de tension en fonction des champs clairs/foncés détectés.

Dans le cas de systèmes de mesure incrémentale, la course des machines-outils et des machines de mesure est mesurée en additionnant les impulsions lumineuses. Un réseau de traits d'une extrême précision sert de mesure matérialisée. Les systèmes de mesure absolus permettent d'afficher la position actuelle de la tête de mesure grâce à leur codage.

Les **règles** sont utilisées pour contrôler la rectitude et la planéité (**fig. 1**). Les règles de précision ont des arêtes de contrôle rodées d'une rectitude élevée qui permettent de détecter à l'œil nu différents rais de lumière de petite taille.

Si des pièces sont contrôlées à contre-jour avec des règles de précision, on peut détecter des écarts à partir de 2 μm sur le rai de lumière entre l'arête de contrôle et la pièce.

Les **jauges d'angle fixes** sont des jauges de forme et représentent le plus souvent un angle de 90°. Les équerres à filament, jusqu'à une longueur de branche de 100 x 70 mm avec le degré de précision 00, ont une erreur maximale tolérée de seulement 3 μm pour l'écart de perpendicularité (**fig. 2**). Pour le degré de précision 0, la valeur limite est de 7 μm . Les équerres à filament permettent de contrôler la perpendicularité et la planéité ou d'aligner des surfaces cylindriques ou planes.

■ Jauges

Les jauges matérialisent des cotes ou des formes qui se rapportent en général à des cotes limite (**fig. 3**).

Les **jauges de mesure** font partie du jeu de jauges dans lequel la dimension augmente d'une jauge à l'autre, par ex. les cales étalon parallèles ou les jauges tampons.

Les **jauges de forme** permettent de contrôler les angles, les rayons et les filetages selon le procédé du rai de lumière.

Les **calibres mâchoires** matérialisent les cotes maximales et minimales admissibles. Certains calibres mâchoires matérialisent également la forme en plus des cotes limite, par ex. afin de pouvoir contrôler la forme cylindrique d'un perçage ou le profil de filetages.

Tableau n° 1 : Limites d'erreur d'échelles de mesure de 500 mm de long

Types		Écarts limite $G_o = G_u$
Étalon de comparaison		7,5 μm
Règle de travail		30 μm
Règle flexible		75 μm
Ruban métrique		100 μm
Mètre pliant		1 mm
Système de mesure incrémental		0,5 ... 20 μm
Système de mesure absolu		

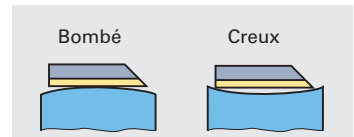


Fig. 1 : Contrôle de la rectitude avec une règle à filament

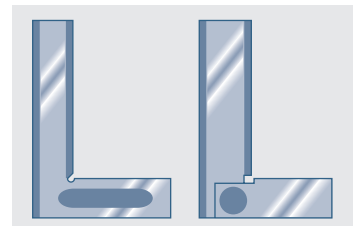


Fig. 2 : Équerre à filament bisautée de précision

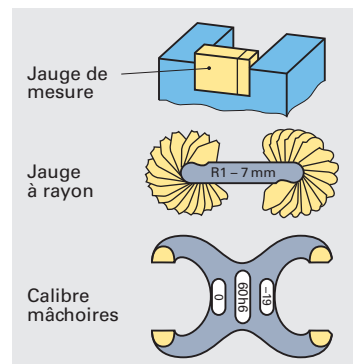


Fig. 3 : Types de jauges

■ Calibres à limite

Les cotes limite de pièces tolérancées peuvent être contrôlées avec des jauges tampon pour les alésages ou avec des jauges bague sur les arbres (fig. 1, fig. 2 et fig. 3).

Principe de Taylor : La jauge « entre » doit être conçue de telle manière que la cote et la forme d'une pièce soient contrôlées lors de l'assemblage avec la jauge (fig. 1). Avec la jauge « n'entre pas », seules certaines cotes doivent être contrôlées, par. ex. le diamètre.

Les jauges « entre » matérialisent la cote **et** la forme.

Les jauges « n'entre pas » sont des jauges uniquement.

- Les jauges « entre » matérialisent la cote maximale sur des arbres et la cote minimale sur les alésages.
- Les jauges « n'entre pas » matérialisent la cote minimale sur des arbres ou la cote maximale sur des alésages. Une pièce qui peut être assemblée avec une jauge « n'entre pas » doit donc être mise au rebut.

On utilise les **jauge tampon** pour contrôler les alésages et les rainures (fig. 4). Le côté « entre » doit glisser dans l'alésage par son poids propre, le côté « n'entre pas » doit seulement s'engager. Des parties en métal dur sont souvent placées le long du côté « entre » dans le but de réduire l'usure. Le côté « n'entre pas » dispose d'un cylindre de contrôle court, est marqué en rouge et porte une inscription signalant l'écart supérieur.

Les **calibres mâchoires** conviennent pour contrôler le diamètre et l'épaisseur des pièces (fig. 5). Le côté « entre » matérialise la cote maximale admissible. Son propre poids doit lui permettre de glisser au-dessus du point à contrôler. Le côté « n'entre pas » est réduit de la tolérance et doit seulement s'engager. Le côté « n'entre pas » a des mâchoires biseautées, est marqué en rouge et porte une inscription signalant l'écart inférieur.

Le résultat du contrôle par jauge est **entre** ou **n'entre pas**. Le jaugage ne donnant pas de valeurs de mesure, les résultats du contrôle ne peuvent pas être utilisés pour la maîtrise de la qualité.

Les fluctuations de la force et l'usure de la jauge influencent considérablement les résultats du contrôle.

Pendant le jaugage, l'incertitude de mesure est d'autant plus importante que les cotes et les tolérances sont petites. Il n'est donc pratiquement pas possible de contrôler les degrés de tolérance inférieurs à 6 ($< IT6$) au moyen de jauges.

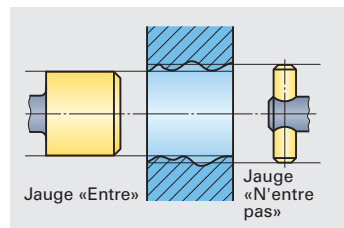


Fig. 1 : Calibre limite selon Taylor

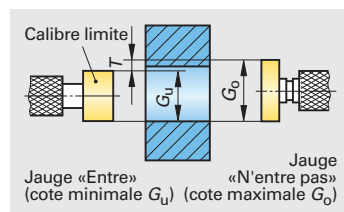


Fig. 2 : Jauge tampon

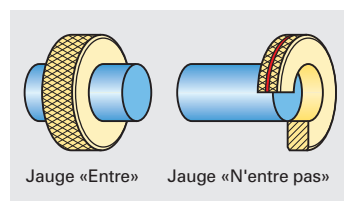


Fig. 3 : Jauges bague

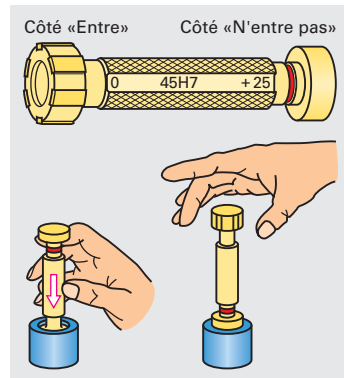


Fig. 4 : Jauge tampon

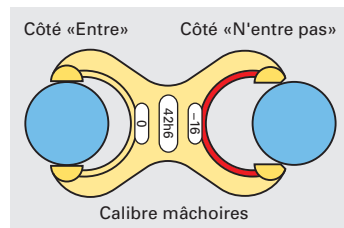


Fig. 5 : Calibre mâchoires

Répétition et approfondissement des connaissances

- 1 Pourquoi les règles de précision et les équerres à filament ont-elles des arêtes de contrôle rodées ?
- 2 Pourquoi le contrôle avec des jauges n'est-il pas approprié pour la maîtrise de la qualité, par ex. pendant le tournage ?
- 3 Pourquoi un calibre mâchoires ne correspond-elle pas au principe de Taylor ?
- 4 À quoi peut-on reconnaître le côté « n'entre pas » d'une jauge tampon ?
- 5 Pourquoi le côté « entre » d'un calibre mâchoires s'use-t-il plus rapidement que le côté « n'entre pas » ?

■ Cales étalon parallèles

Les cales étalons parallèles sont les mesures matérialisées les plus exactes et les plus importantes permettant de contrôler la longueur. La précision de la mesure des cales étalon est fonction de la classe d'éta-lonnage et de la longueur nominale (**tableau n° 1** et **fig. 1**). La tolérance de variation de longueur t_v limite les écarts de planéité et de parallé-lisme tandis que l'écart limite de longueur t_e décrit l'écart de longueur en tout point par rapport à la longueur nominale.

Tableau n° 1 : Les cales étalon parallèles (valeurs en µm pour les longueurs nominales 10 ... 25 mm)			
Classe d'éta-lonnage	Tolérance de variation de longueur t_v	Écart limite de longueur t_e	Utilisation
K	0,05	± 0,3	Étalons de référence pour étalonner des cales étalon et pour régler des instruments de mesure et des jauges précis
0	0,1	± 0,14	Réglage et étalonnage de jauges et instru-ments de mesure dans des locaux climatisés
1	0,16	± 0,3	Étalons de travail les plus utilisés pour effectuer des contrôles dans des locaux mesure et dans la production
2	0,3	± 0,6	Étalons de travail pour régler et contrôler des outils, des machines et des dispositifs

Les cales étalons de la **classe d'éta-lonnage K** présentent les plus petits écarts de planéité et de parallélisme, ce qui est d'une grande impor-tance pour obtenir des mesures et combinaisons exactes de cales étalon (**fig. 3**). Les écarts limite relativement grands de la longueur sont com-pensés par la valeur de correction connue K (page 11). Il est possible d'accoler les cales étalon des **classes de tolérance K et 0 sans pression** (**fig. 2**).

Lors de la composition d'une combinaison de cales étalon, on com-mence par la plus petite cale étalon (**tableau n° 2** et **fig. 3**). Sur les **cales étalons en acier** accolées, on observe, après un certain temps, une ten-dance à se souder à froid. Il est donc recommandé de les séparer après utilisation.

Par comparaison avec les cales étalon en acier, les **cales étalon en métal dur** sont 10 fois plus résistantes à l'usure. La dilatation thermique réduite de 50 % pouvant entraîner des écarts de mesure sur les pièces en acier est un désavantage.

Les **cales étalons en céramique** présentent une dilatation thermique comparable à celle de l'acier. Elles sont extrêmement résistantes à l'usure, aux rayures et à la corrosion.

Les instruments de mesure et les jauges sont contrôlés au moyen de cales étalon et de jauges cylindriques (**fig. 4**). Les cales étalons paral-lèles sont le plus souvent composées de 46 pièces, réparties dans 5 sé-ries de jeux de longueurs (**tableau n° 3**).

Règles de travail pour l'utilisation de cales étalons

- Avant l'utilisation, il convient d'essuyer les cales étalons avec un chiffon non pelucheux (chiffon de lin).
- En raison de la déviation globale, les combinaisons de cales étalon doivent être constituées d'un nombre de cales étalon le plus petit possible.
- Les cales étalon en acier ne doivent pas rester collées les unes aux autres plus de 8 heures, sinon, elles se soudent à froid.
- Après l'utilisation, les cales étalon en acier ou en métal dur doivent être nettoyées et graissées avec de la vaseline chimiquement neutre.

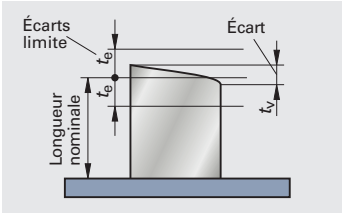


Fig. 1 : Écarts d'une cale étalon

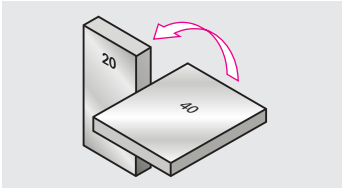


Fig. 2 : Accolement de cales étalons



Fig. 3 : Combinaison de cales étalon



Fig. 4 : Contrôle d'un calibre mâchoires avec des cales étalons et une jauge cylindrique

Tableau n° 2 : Combinaison de cales étalon	
1. Cale étalon	1,003 mm
2. Cale étalon	9,000 mm
3. Cale étalon	50,000 mm
Combinaison de cales étalon : 60,003 mm	

Tableau n° 3 : Jeu de cales étalon		
Série	longueurs nominales mm	Échelon nement mm
1	1,001 ... 1,009	0,001
2	1,01 ... 1,09	0,01
3	1,1 ... 1,9	0,1
4	1 ... 9	1
5	10 ... 100	10