



# Techniques de la mécanique

**3<sup>ème</sup> édition française**

Éditeur de matériel pédagogique :  
VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG  
Düsseldorfberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten, Allemagne

**N° de la maison d'édition : 11664**

Titre original: Fachkunde Metall (58<sup>ème</sup> édition 2017, 4<sup>ème</sup> quota d'impression)

### Auteurs:

Dillinger, Josef	Directeur hors classe	Munich, Allemagne
Escherich, Walter	Directeur hors classe	Munich, Allemagne
Ignatowitz, Dr Eckhard	Docteur ingénieur	Waldbronn, Allemagne
Oesterle, Stefan	Ingénieur diplômé	Amtzell, Allemagne
Reißler, Ludwig	Directeur hors classe	Munich, Allemagne
Stephan, Andreas	Ingénieur diplômé	Kressbronn, Allemagne
Vetter, Reinhard	Professeur principal	Ottobeuren, Allemagne
Wieneke, Falko	Ingénieur diplômé	Essen, Allemagne

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

### Techniques de la mécanique

#### Relecture:

Caquereau Jacques, EPT, Sion, Suisse  
 Carrera Miguel, EPT, Sion, Suisse  
 Frédéric Grand, EPT, Sion, Suisse  
 Gosteli Pascal, ceff, Moutier, Suisse  
 Jeanrichard Claude-Alain, ETML, Lausanne, Suisse  
 Kohler Marc-André, CEJEF, Porrentruy, Suisse  
 Kottelat Jean-Claude, Courroux, Suisse  
 Vallaro Giovanni, EPT, Sion, Suisse  
 Voumard Claude-Michel, ceff, Moutier, Suisse  
 Enseignants division mécanique EPSIC, Lausanne, Suisse  
 Enseignants ceff INDUSTRIE, St. Imier, Suisse

#### Responsable de projet:

Oliver Schmid, Swissmem Formation professionnelle, Winterthur, Suisse

**Images:** Les auteurs

**Photos:** Prêts des entreprises (répertoriées page 680)

**Traitement d'image:** Bureau de dessin de la maison d'édition Europa-Lehrmittel, Ostfildern, Allemagne

**Traduction anglaise:** OStRin Christina Murphy, Wolfratshausen, Allemagne

3<sup>ème</sup> édition française 2020

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 978-3-7585-1088-5

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.

Maquette de la couverture : Sauter Feinmechanik GmbH, 72555 Metzingen, Allemagne; TESA/Brown & Sharpe, Renens, Suisse

© 2020 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten, Allemagne  
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Traduction et composition: A.C.T. Fachübersetzungen GmbH, 41066 Mönchengladbach, Allemagne  
 Impression: Himmer GmbH, 86167 Augsburg, Allemagne

## Préface

L'ouvrage *Techniques de la mécanique* sert à la formation de base et continue aux métiers des constructions mécaniques.

### Groupes-cibles

- Mécaniciens industriels
- Mécaniciens de précision
- Mécaniciens de production
- Mécaniciens sur machines-outils
- Concepteurs techniques de produit
- Contremaîtres et techniciens
- Praticiens dans l'industrie transformatrice des métaux et dans l'artisanat
- Élèves d'écoles techniques
- Stagiaires et étudiants dans la discipline Constructions mécaniques

### Table des matières

Le contenu de ce livre est divisé en dix principaux chapitres. Il est harmonisé avec les plans éducatifs et règlements de formation des groupes professionnels susmentionnés ainsi qu'avec les programmes d'études définis par la Conférence des ministres de l'éducation (KMK), et il tient compte des évolutions les plus récentes dans le domaine technique.

Le **répertoire des termes techniques** contient des termes techniques également en langue **anglaise**.

### Enseignement par domaines d'apprentissage

Les programmes d'étude cadres orientés sur le domaine d'apprentissage requièrent des formes d'enseignement orientées sur l'action, formes via lesquelles l'apprenant peut convertir en pratique, dans l'entreprise, les connaissances acquises. L'acquisition de cette aptitude est proposée dans treize domaines d'apprentissage, via respectivement un projet directeur assorti d'une préconisation de transposition.

## Préface de la 58<sup>ème</sup> édition

La présente édition, actualisée, s'enrichit des nouveaux contenus suivants :

- Moyens de contrôle des longueurs :  
Instruments de mesure des coordonnées,  
Spécifications géométriques du produit (GPS)
- Techniques de fabrication :  
Outils de tournage,  
Ébavurage de pièces,  
Fusion sélective
- Automatisation de la fabrication :  
Industrie 4.0
- Technique d'automatisation :  
Tous schémas des circuits conformes à la norme de référence DIN EN 81346-2
- Projets techniques :  
Élaboration de dossiers et documentations techniques, notices d'instructions, communication technique, solutions de bureau dans la documentation

Les auteurs et la maison d'édition remercient tous les utilisateurs de l'ouvrage « Connaissance des métaux » pour leurs remarques critiques et préconisations d'amélioration qu'ils voudront bien adresser à [lektorat@europa-lehrmittel.de](mailto:lektorat@europa-lehrmittel.de).

**1 Métrologie**  
**2 Management de la qualité**

12 ... 92

**3 Technique de fabrication**

93 ... 273

**4 Automatisation de la fabrication**

274 ... 330

**5 Technique des matériaux**

331 ... 411

**6 Génie mécanique**  
**7 Électrotechnique**  
**8 Montage, mise en service, entretien**

412 ... 545

**9 Technique de commande**  
**10 Projets techniques**

546 ... 652

# Sommaire

<b>1 Métrologie</b>			
<b>1.1</b>	<b>Grandeurs et unités</b>	13	
<b>1.2</b>	<b>Bases de la métrologie</b>	15	
1.2.1	Notions de base	15	
1.2.2	Erreurs de mesure	18	
1.2.3	Capabilité des moyens de contrôle et surveillance des moyens de contrôle	21	
<b>1.3</b>	<b>Moyens de contrôle des longueurs</b>	23	
1.3.1	Règles, jauges, calibres et étalons	23	
1.3.2	Instruments de mesure mécaniques et électroniques	26	
1.3.3	Instruments de mesure pneumatiques	34	
1.3.4	Instruments de mesure électroniques	36	
1.3.5	Instruments de mesure optoélectroniques	37	
1.3.6	Instruments de mesure des coordonnées	39	
<b>1.4</b>	<b>Contrôle des états de surfaces</b>	43	
1.4.1	Profil des surfaces	43	
1.4.2	Paramètres d'état de surface	44	
1.4.3	Procédés de contrôle des surfaces	45	
<b>1.5</b>	<b>Tolérances et ajustements</b>	47	
1.5.1	Tolérances	47	
1.5.2	Ajustements	51	
<b>1.6</b>	<b>Spécifications géométriques du produit (GPS)</b>	55	
<b>1.7</b>	<b>Contrôle de la forme et de la position</b>	58	
1.7.1	Tolérances de forme et de position	58	
1.7.2	Contrôle des surfaces planes et inclinées	60	
1.7.3	Contrôle de la circularité, de la coaxialité et du battement	63	
1.7.4	Contrôle des filetages	68	
1.7.5	Contrôle de la conicité	70	
<b>1.8</b>	<b>Practise your English</b>	71	
<b>2 Management de la qualité</b>			
<b>2.1</b>	<b>Domaines de travail du MQ</b>	72	
<b>2.2</b>	<b>La série de normes EN ISO 9000</b>	73	
<b>2.3</b>	<b>Exigences de qualité</b>	73	
<b>2.4</b>	<b>Caractéristiques de qualité et défauts</b>	74	
<b>2.5</b>	<b>Outils du management de la qualité</b>	75	
<b>2.6</b>	<b>Maîtrise de la qualité</b>	78	
<b>2.7</b>	<b>Assurance de la qualité</b>	79	
<b>2.8</b>	<b>Capabilité des procédés</b>	83	
<b>2.9</b>	<b>Performance des procédés</b>	86	
<b>2.10</b>	<b>Maîtrise statistique des procédés au moyen de cartes de contrôle de la qualité</b>	87	
<b>2.11</b>	<b>Audit et certification</b>	90	
<b>2.12</b>	<b>Processus d'amélioration continu : les collaborateurs optimisent les procédés</b>	91	
<b>2.13</b>	<b>Practise your English</b>	92	
<b>3 Technique de fabrication</b>			
<b>3.1</b>	<b>Sécurité au travail</b>	94	
<b>3.2</b>	<b>Différents procédés de fabrication</b>	96	
<b>3.3</b>	<b>Moulage</b>	98	
3.3.1	Moules et modèles	98	
3.3.2	Moulage en moules perdus	99	
3.3.3	Moulage en moules permanents	102	
3.3.4	Matériaux de moulage	103	
3.3.5	Défauts de coulée	103	
<b>3.4</b>	<b>Mise en forme des matières plastiques</b>	104	
3.4.1	Extrusion	104	
3.4.2	Moulage par injection	105	
3.4.3	Moulage par compression	108	
3.4.4	Formage des matières en mousse	108	
3.4.5	Mise en forme des produits semi-finis et finis à partir de matières plastiques	109	
<b>3.5</b>	<b>Formage</b>	111	
3.5.1	Comportement des matériaux lors du formage	111	
3.5.2	Procédés de formage	111	
3.5.3	Déformation plastique par flexion	112	
3.5.4	Déformation plastique par traction et compression	115	
3.5.5	Déformation plastique par compression	119	
3.5.6	Presses	121	
<b>3.6</b>	<b>Coupe</b>	122	
3.6.1	Cisaillage	122	
3.6.2	Découpage sans contact	127	
<b>3.7</b>	<b>Fabrication par enlèvement de copeaux, guidée à la main</b>	131	
3.7.1	Bases	131	
3.7.2	Fabrication avec des outils à main	132	
<b>3.8</b>	<b>Fabrication avec des machines-outils</b>	136	
3.8.1	Matériaux de coupe	136	
3.8.2	Lubrifiants réfrigérants	140	
3.8.3	Sciage	143	
3.8.4	Perçage, taraudage, fraisage, alésage	144	
3.8.5	Fraisage et chanfreinage de trous	153	
3.8.6	Alésage	154	
3.8.7	Tournage	156	
3.8.8	Fraisage	180	
3.8.9	Ébavurage de pièces	197	
3.8.10	Rectification	200	
3.8.11	Brochage	212	
3.8.12	Superfinition	214	
3.8.13	Enlèvement par électro-érosion	220	
3.8.14	Dispositifs et éléments de serrage sur des machines-outils	224	
3.8.15	Exemple de fabrication d'une bride de serrage	231	
<b>3.9</b>	<b>Liaison</b>	235	
3.9.1	Procédé de liaison	235	
3.9.2	Assemblage par sertissage et par enclenchement	238	
3.9.3	Collage	240	
3.9.4	Brasage	242	
3.9.5	Soudage	248	
<b>3.10</b>	<b>Procédés de fabrication additifs</b>	261	
3.10.1	Prototypage rapide	262	
3.10.2	Outillage rapide	264	
<b>3.11</b>	<b>Enduction</b>	266	
<b>3.12</b>	<b>Atelier de fabrication et protection de l'environnement</b>	270	
<b>3.13</b>	<b>Practise your English</b>	273	

## 4 Automatisation de la fabrication

<b>4.1</b>	<b>Commandes CNC pour machines-outils</b> . . . . .	275	<b>4.3</b>	<b>Machines-outils CNC automatisées</b> . . . . .	318
4.1.1	Caractéristiques des machines à commande CNC	275	4.3.1	Automatisation d'un centre d'usinage CNC	318
4.1.2	Coordonnées, points d'origine et points de références	279	4.3.2	Automatisation d'un tour CNC	320
4.1.3	Types de commande, correcteurs d'outils	281	<b>4.4</b>	<b>Systèmes de transport dans des installations de fabrication automatisées</b>	322
4.1.4	Création des programmes CNC selon ISO	284	<b>4.5</b>	<b>Dispositifs de surveillance dans les machines-outils</b>	323
4.1.5	Cycles et sous-programmes	289	<b>4.6</b>	<b>Niveaux d'automatisation des installations de fabrication</b>	324
4.1.6	Programmation de tours CNC	290	<b>4.7</b>	<b>Exemple d'un système de fabrication automatisé pour arbres de transmission</b>	325
4.1.7	Programmation de fraiseuses CNC	298	<b>4.8</b>	<b>Industrie 4.0</b>	326
4.1.8	Processus de programmation	304	<b>4.9</b>	<b>Exigences technico-commerciales et objectifs de la fabrication</b>	328
4.1.9	Usinage à 5 axes selon PAL	306	<b>4.10</b>	<b>Flexibilité et productivité d'installations de fabrication</b>	328
<b>4.2</b>	<b>Technique de manutention dans l'automatisation</b>	310	<b>4.11</b>	<b>Practise your English</b>	330
4.2.1	Technique des systèmes de manutention	310			
4.2.2	Classification des systèmes de manutention	311			
4.2.3	Cinématique et types de construction de robots industriels	311			
4.2.4	Unités fonctionnelles de robots industriels	313			
4.2.5	Programmation des robots industriels	313			
4.2.6	Systèmes de coordonnées	314			
4.2.7	Types de mouvements des robots industriels	315			
4.2.8	Communication des robots industriels et des périphéries	316			
4.2.9	Sécurité dans l'utilisation de systèmes de manutention	317			

## 5 Technique des matériaux

<b>5.1</b>	<b>Aperçu des matériaux et des matières auxiliaires</b>	332	5.8.3	Structure en cas d'augmentation de la température	373
<b>5.2</b>	<b>Choix et propriétés des matériaux</b>	334	5.8.4	Le recuit	374
<b>5.3</b>	<b>Structure interne des métaux</b>	340	5.8.5	Trempe	375
5.3.1	Structure interne et propriétés des métaux	340	5.8.6	Amélioration	379
5.3.2	Types de mailles dans les métaux	341	5.8.7	Durcissement de surface	380
5.3.3	Défaut structurel dans le cristal	342	5.8.8	Exemple de fabrication : traitement thermique d'une griffe de serrage	383
5.3.4	Formation de la structure du métal	342	<b>5.9</b>	<b>Matières plastiques</b>	384
5.3.5	Types de structure et propriétés du matériau	343	5.9.1	Propriétés et utilisation	384
5.3.6	Structure des métaux purs et structure des alliages	344	5.9.2	Composition chimique et fabrication	385
<b>5.4</b>	<b>Aciers et matériaux en fonte de fer</b>	345	5.9.3	Classification technologique et structure interne	386
5.4.1	Production de la fonte de première fusion	345	5.9.4	Thermoplastes	387
5.4.2	Production de l'acier	346	5.9.5	Duroplastes	389
5.4.3	Système de désignation des aciers	349	5.9.6	Elastomères	390
5.4.4	Classification des aciers selon leur composition et leurs classes de qualité	352	5.9.7	Valeurs caractéristiques des matières plastiques	390
5.4.5	Les nuances d'acier et leur utilisation	353	<b>5.10</b>	<b>Matériaux composites</b>	392
5.4.6	Formes commerciales des aciers	355	<b>5.11</b>	<b>Essais des matériaux</b>	397
5.4.7	Éléments d'alliage et résiduels des aciers et des matériaux en fonte de fer	356	5.11.1	Essai des propriétés technologiques	397
5.4.8	Production des matériaux en fonte de fer	357	5.11.2	Contrôle des propriétés mécaniques	398
5.4.9	Le système de désignation des matériaux en fonte de fer	358	5.11.3	Essai de résilience	400
5.4.10	Types de matériaux en fonte de fer	359	5.11.4	Essais de dureté	401
5.4.11	Comparaison entre la teneur en carbone des aciers et celle des métaux ferreux de fonderie	361	5.11.5	Essai de fatigue	405
<b>5.5</b>	<b>Métaux non ferreux</b>	362	5.11.6	Essai de charge de fonctionnement	406
5.5.1	Métaux légers	362	5.11.7	Essais non destructifs	406
5.5.2	Métaux lourds	364	5.11.8	Contrôles métallographiques	407
<b>5.6</b>	<b>Matériaux frittés</b>	367	5.11.9	Contrôle des caractéristiques des matières plastiques	408
<b>5.7</b>	<b>Matériaux en céramique</b>	369	<b>5.12</b>	<b>Problèmes environnementaux causés par les matériaux et les matières auxiliaires</b>	409
<b>5.8</b>	<b>Traitements thermiques des aciers</b>	371	<b>5.13</b>	<b>Practise your English</b>	411
5.8.1	Types de structures des matériaux ferreux	371			
5.8.2	Diagramme de phases fer-carbone	372			

## 6 Génie mécanique

<b>6.1</b>	<b>Classification des machines</b> .....	413	<b>6.4.3</b>	Guidages .....	458
<b>6.2</b>	<b>Unités fonctionnelles des machines et appareils</b> .....	421	<b>6.4.4</b>	Joint d'étanchéité .....	461
6.2.1	Structure interne des machines .....	421	<b>6.4.5</b>	Ressorts .....	463
6.2.2	Unités fonctionnelles d'une machine-outil CNC .....	423	<b>6.5</b>	<b>Unités fonctionnelles pour la transmission d'énergie</b> .....	465
6.2.3	Unités fonctionnelles d'une climatisation .....	425	6.5.1	Arbres et axes .....	465
6.2.4	Dispositifs de sécurité sur des machines .....	426	6.5.2	Accouplements .....	467
<b>6.3</b>	<b>Unités fonctionnelles pour la liaison</b> .....	428	6.5.3	Entraînements par courroie .....	472
6.3.1	Filetage .....	428	6.5.4	Entraînements par chaîne .....	474
6.3.2	Assemblages par vis .....	430	6.5.5	Entraînements par roues dentées .....	476
6.3.3	Assemblages par goupilles .....	438	<b>6.6</b>	<b>Unités d'entraînement</b> .....	479
6.3.4	Assemblages par rivets .....	440	6.6.1	Moteurs électriques .....	479
6.3.5	Liaisons arbre – moyeu .....	442	6.6.2	Transmission .....	486
<b>6.4</b>	<b>Unités fonctionnelles pour l'appui et le soutien</b> .....	446	6.6.3	Entraînements pour des mouvements rectilignes (entraînements linéaires) .....	492
6.4.1	Frottement et lubrifiants .....	446	<b>6.7</b>	<b>Practise your English</b> .....	494
6.4.2	Paliers .....	449			

## 7 Electrotechnique

<b>7.1</b>	<b>Le circuit de courant électrique</b> .....	495	<b>7.7</b>	<b>Mesures de protection sur les machines électriques</b> .....	504
<b>7.2</b>	<b>Circuit de résistance</b> .....	498	<b>7.8</b>	<b>Consignes relatives au maniement des appareils électriques</b> .....	506
<b>7.3</b>	<b>Types de courant</b> .....	500	<b>7.9</b>	<b>Practise your English</b> .....	507
<b>7.4</b>	<b>Puissance et énergie électrique</b> .....	501			
<b>7.5</b>	<b>Dispositifs de protection contre les surintensités</b> .....	502			
<b>7.6</b>	<b>Défaillances sur les installations électriques</b> ..	503			

## 8 Montage, mise en service, entretien

<b>8.1</b>	<b>Technique de montage</b> .....	508	8.3.6	Inspection .....	529
8.1.1	Planification du montage .....	508	8.3.7	Remise en état .....	531
8.1.2	Formes d'organisation du montage .....	509	8.3.8	Améliorations .....	533
8.1.3	Automatisation du montage .....	509	8.3.9	Détection de défauts et de sources d'erreurs ..	534
8.1.4	Exemples de montage .....	510	<b>8.4</b>	<b>Corrosion et protection contre la corrosion</b> ..	535
<b>8.2</b>	<b>Mise en service</b> .....	516	8.4.1	Causes de corrosion .....	535
8.2.1	Implantation de machines ou d'installations ..	517	8.4.2	Types de corrosion et leur aspect .....	537
8.2.2	Mise en service de machines ou d'installations	518	8.4.3	Mesures de protection anticorrosion .....	538
8.2.3	Réception de machines ou d'installations .....	520	<b>8.5</b>	<b>Analyse de la sécurité et évitement des dommages</b> .....	541
<b>8.3</b>	<b>Entretien</b> .....	521	<b>8.6</b>	<b>Sollicitation et solidité des éléments de construction</b> .....	543
8.3.1	Domaines d'activité et définitions .....	521	<b>8.7</b>	<b>Practise your English</b> .....	545
8.3.2	Termes de la maintenance .....	522			
8.3.3	Objectifs de la maintenance .....	523			
8.3.4	Concepts de maintenance .....	523			
8.3.5	Entretien .....	526			

## 9 Technique de commande

<b>9.1 Pilotage et régulation</b> . . . . .	547	<b>9.4.4</b> Exemples de commandes électropneumatiques . . . . .	588
9.1.1 Bases de la technique de commande . . . . .	547	<b>9.4.5</b> Îlots de vannes . . . . .	593
9.1.2 Bases de la technique de régulation . . . . .	549	<b>9.5 Commandes hydrauliques</b> . . . . .	594
<b>9.2 Principes et éléments de base des commandes</b> . . . . .	553	9.5.1 Alimentation électrique et conditionnement du fluide . . . . .	595
9.2.1 Mode de fonctionnement des commandes . . . . .	553	9.5.2 Eléments de travail et accumulateurs hydrauliques . . . . .	597
9.2.2 Eléments des commandes . . . . .	554	9.5.3 Vannes hydrauliques . . . . .	601
<b>9.3 Commandes pneumatiques</b> . . . . .	559	9.5.4 Systèmes hydrauliques proportionnels . . . . .	605
9.3.1 Sous-ensembles des installations pneumatiques . . . . .	559	9.5.5 Conduites hydrauliques et accessoires . . . . .	607
9.3.2 Composants pneumatiques . . . . .	560	9.5.6 Exemples de circuits hydrauliques . . . . .	609
9.3.3 Schémas des commandes pneumatiques . . . . .	569	<b>9.6 Automates Programmables Industriels (API)</b> . . . . .	612
9.3.4 Projet de schéma de connexion systématique . . . . .	570	9.6.1 Micro-API (module logique) . . . . .	612
9.3.5 Exemples de commandes pneumatiques . . . . .	574	9.6.2 Automates programmables industriels modulaires (API modulaire) . . . . .	615
9.3.6 Technologie du vide . . . . .	577	<b>9.7 Practise your English</b> . . . . .	624
<b>9.4 Commandes électropneumatiques</b> . . . . .	579		
9.4.1 Composants des commandes à contact électrique . . . . .	579		
9.4.2 Capteurs et éléments de signalisation . . . . .	582		
9.4.3 Câblage avec des borniers . . . . .	587		

## 10 Projets techniques

<b>10.1 Fondements du travail de projet</b> . . . . .	625	10.3.4 La phase de mise en œuvre avec réalisation du projet . . . . .	636
10.1.1 Organisation du travail en ligne et en projet . . . . .	625	10.3.5 L'achèvement du projet . . . . .	638
10.1.2 Le concept du projet . . . . .	625	<b>10.4 Modèles méthodologiques modifiés dans le travail de projet</b> . . . . .	639
10.1.3 Types de projets techniques . . . . .	626	<b>10.5 Documentation et documents techniques</b> . . . . .	640
<b>10.2 Travail de projet en tant qu'action complète et résolution planifiée de problèmes</b> . . . . .	626	10.5.1 Élaboration de dossiers et documentations techniques . . . . .	640
<b>10.3 Elaborer les projets par phases, à l'exemple de projet du dispositif de levage</b> . . . . .	627	10.5.2 Instructions . . . . .	640
10.3.1 La phase d'initialisation . . . . .	627	10.5.3 Communication technique . . . . .	641
10.3.2 La phase de définition . . . . .	628	10.5.4 Solutions Office dans la documentation . . . . .	647
10.3.3 La phase de planification avec développement du concept . . . . .	631	<b>10.6 Practise your English</b> . . . . .	652

## Champ d'apprentissage

<b>Champ d'apprentissage: Fabrication de composants avec des outils à main</b> . . . . .	654
<b>Champ d'apprentissage: Fabrication de composants avec des machines</b> . . . . .	656
<b>Champ d'apprentissage: Fabrication de sous-groupes simples</b> . . . . .	658
<b>Champ d'apprentissage: Entretien des systèmes techniques</b> . . . . .	660
<b>Champ d'apprentissage: Fabrication de pièces distinctes avec des machines-outils</b> . . . . .	662
<b>Champ d'apprentissage: Installation et mise en service des systèmes de technique de régulation</b> . . . . .	664
<b>Champ d'apprentissage: Montage des systèmes techniques</b> . . . . .	666
<b>Champ d'apprentissage: Programmation et fabrication sur les machines-outils à commande numérique</b> . . . . .	668
<b>Champ d'apprentissage: Remise en état des systèmes techniques</b> . . . . .	670
<b>Champ d'apprentissage: Fabrication et mise en service des systèmes techniques partiels</b> . . . . .	672
<b>Champ d'apprentissage: Suivi de la qualité des produits et processus</b> . . . . .	674
<b>Champ d'apprentissage: Entretien des systèmes techniques</b> . . . . .	676
<b>Champ d'apprentissage: Assurance de la capacité de fonctionnement des systèmes automatisés</b> . . . . .	678

<b>Répertoire des entreprises et crédit photos</b> . . . . .	680
--	-----

<b>Index avec traduction en anglais</b> . . . . .	683
---	-----

## Boussole de champ d'apprentissage

Avec la boussole de champ d'apprentissage, on apporte une aide à l'utilisateur en écoles professionnelles dans le domaine de la technologie des métaux qui permet de servir de support thématique au cours.

Les contenus du cours professionnel Métal sont structurés de façon logique afin de permettre aux enseignants et aux élèves un niveau élevé de liberté didactique et méthodologique. La structure choisie dans l'ouvrage doit conduire les élèves à élaborer de façon indépendante les différents contenus disciplinaires requis dans les champs d'apprentissage.

Le choix des chapitres qui suit pour les champs d'apprentissage issus des différents plans d'études cadres montre l'affectation des chapitres et les contenus du manuel spécialisé concernant les différents champs d'apprentissage. Il sert de suggestion et de référence afin de pouvoir effectuer un enseignement ciblé par champ d'apprentissage. Informations sur l'enseignement orienté sur le domaine d'apprentissage : voir p. 653

Champ d'apprentissage	Informations factuelles dans le livre (exemples)
<b>Fabrication de composants avec des outils à main</b>	<b>Projet : Porte-clés</b> . . . . . 654
Préparation et fabrication des composants professionnels avec des outils à main.	3.7.2 Fabrication avec des outils à main
Création et modification des dessins pour sous-groupes simples.	1.2 Bases de la métrologie 1.2.1 Notions de base 1.2.2 Erreurs de mesure 1.2.3 Capabilité des moyens de mesure 1.3 Moyens de contrôle des longueurs 1.5 Tolérances et ajustements
Planification des étapes de travail avec des outils et des matériaux et mise en œuvre des calculs.	2.7.1 Planification des contrôles 3.2 Différents procédés de fabrication
Sélection, application des moyens de contrôle appropriés et contrôle des résultats.	3.5.1 Comportement des matériaux lors du formage 3.5.2 Procédés de formage 3.5.3 Déformation plastique par flexion
Détermination approximative des coûts de fabrication.	3.6 Coupe 3.6.1 Cisailage 5.1 Aperçu des matériaux et des matières auxiliaires 5.2 Choix et propriétés des matériaux 5.4 Aciers et matériaux en fonte de fer 5.5 Métaux non ferreux 5.9 Matières plastiques 5.10 Matériaux composites
Documentation et présentation des résultats de travail.	10.5 Documentation des documents techniques
Respect des dispositions en matière de sécurité au travail et de protection de l'environnement.	3.1 Sécurité au travail 3.12 Atelier de fabrication et protection de l'environnement 5.12 Problèmes environnementaux causés par les matériaux et les matières auxiliaires
<b>Fabrication de composants avec des machines</b>	<b>Projet : Dispositif de serrage pour pièces rondes</b> . . . . 656
Evaluation des dessins et des listes de pièces.	6.6 Unités d'entraînement 6.5 Unités fonctionnelles pour la transmission d'énergie
Choix des matériaux selon les propriétés spécifiques.	1.4 Contrôle des états de surface
Planification du déroulement de la fabrication avec des calculs.	1.5 Tolérances et ajustements 3.8 Fabrication avec des machines-outils 3.9 Liaison 5.4 Aciers et matériaux en fonte de fer 6.6 Unités d'entraînement 6.5 Unités fonctionnelles pour la transmission d'énergie
Conception et fonctionnement des machines.	6.1 Classification des machines 6.2 Unités fonctionnelles des machines et appareils 3.8.1 Matériaux de coupe
Utilisation des outils.	1.2 Bases de la métrologie 1.2.1 Notions de base
Choix et utilisation des moyens de contrôle.	

Champ d'apprentissage	Informations factuelles dans le livre (exemples)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.2.2 Erreurs de mesure</li> <li>1.2.3 Capabilité des moyens de mesure</li> <li>1.3 Moyens de contrôle des longueurs</li> <li>2 Management de la qualité</li> <li>2.3 Exigences de qualité</li> <li>2.4 Caractéristiques de qualité et défauts</li> <li>2.7.1 Planification des contrôles</li> </ul>
Documentation et présentation des résultats de travail.	10.5 Documentation des documents techniques
Respect des dispositions en matière de sécurité au travail et de protection de l'environnement.	<ul style="list-style-type: none"> <li>3.1 Sécurité au travail</li> <li>3.12 Atelier de fabrication et protection de l'environnement</li> <li>5.12 Problèmes environnementaux causés par les matériaux et les matières auxiliaires</li> </ul>
<hr/>	
<b>Fabrication de sous-groupes simples</b>	<b>Projet : Support de perçage pour perceuse à main . . . 658</b>
Lecture et compréhension de dessins de groupes et de schémas de connexion.	6.1 Classification des machines
Planification de commandes simples.	6.4 Unités fonctionnelles pour l'appui et le soutien
Montage de sous-groupes.	6.6 Unités d'entraînement
Marquage de pièces conformes à la norme.	6.5 Unités fonctionnelles pour la transmission d'énergie
	9.3.3 Schémas des commandes pneumatiques
	9.3.4 Projet de schéma de connexion systématique
	9.3.5 Exemples de commandes pneumatiques
	3.9 Liaison
Distinction du procédé d'assemblage.	5.4 Aciers et matériaux en fonte de fer
Choix des outils et des pièces normalisées.	
Documentation et présentation des résultats de travail.	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 Management de la qualité</li> <li>2.1 Domaines de travail du MQ</li> <li>2.2 La série de normes EN ISO 9000</li> <li>2.3 Exigences de qualité</li> <li>2.4 Caractéristiques de qualité et défauts</li> </ul>
	10.1.1 Organisation du travail en ligne et en projet
	10.5.3 Communication technique
	10.5.4 Solutions Office dans la documentation
Respect des dispositions en matière de sécurité au travail et de protection de l'environnement.	<ul style="list-style-type: none"> <li>3.1 Sécurité au travail</li> <li>3.12 Atelier de fabrication et protection de l'environnement</li> <li>5.12 Problèmes environnementaux causés par les matériaux et les matières auxiliaires</li> </ul>
<hr/>	
<b>Entretien des systèmes techniques</b>	<b>Projet : Entretien d'une perceuse à colonne . . . . . 660</b>
Évaluation des mesures de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Métrologie</li> <li>1.1 Grandeurs et unités</li> <li>8.3 Entretien</li> <li>8.4 Corrosion et protection contre la corrosion</li> <li>8.5 Analyse de la sécurité et évitement des dommages</li> <li>8.6 Sollicitation et solidité des éléments de construction</li> </ul>
Planification des travaux d'entretien, détermination des outils et des matières auxiliaires.	<ul style="list-style-type: none"> <li>5.1.3 Matières auxiliaires et énergie</li> <li>6.6 Unités d'entraînement</li> <li>6.5 Unités fonctionnelles pour la transmission d'énergie</li> <li>6.4.1 Lubrifiants</li> <li>8.3.6 Inspection</li> </ul>
Documentation et présentation des résultats de travail.	10.5 Documentation des documents techniques
Respect des dispositions en matière de sécurité au travail et de protection de l'environnement.	<ul style="list-style-type: none"> <li>3.1 Sécurité au travail</li> <li>3.12 Atelier de fabrication et protection de l'environnement</li> <li>5.12 Problèmes environnementaux causés par les matériaux et les matières auxiliaires</li> </ul>

Champ d'apprentissage	Informations factuelles dans le livre (exemples)
<b>Fabrication de pièces distinctes avec des machines-outils</b>	<b>Projet : Élément de serrage hydraulique</b> ..... 662
Fabrication de pièces à partir de différents matériaux sur des machines-outils.	3.8 Fabrication avec des machines-outils 5.4.3 Système de désignation des aciers 2.4 Caractéristiques de qualité et défauts 2.7.1 Planification des contrôles
Sélection des procédés de fabrication appropriés et choix du moyen de serrage pour outils et pièces.	1.2 Bases de la métrologie 1.3 Moyens de contrôle des longueurs 1.4 Contrôle des états de surface 1.5 Tolérances et ajustements 1.7 Contrôle de la forme et de la position
Recuit, trempe, trempe et revenu.	5.4 Aciers et matériaux en fonte de fer 2.4 Caractéristiques de qualité et défauts 2.7.1 Planification des contrôles 5.8 Traitement thermique des aciers
Développement des plans de contrôle avec les moyens de management de la qualité.	
<b>Installation et mise en service des systèmes de technique de régulation</b>	<b>Projet : Séparation des différentes billes en métal</b> ..... 664
Installation et mise en service des systèmes de technique de régulation. Détermination des composants et des séquences fonctionnelles dans différentes techniques d'appareils à partir de commandes. Conception et mise en service des différentes commandes.	6.1 Classification des machines 10.3 Elaborer des projets par phases, en prenant un dispositif élévateur comme exemple 6.6 Unités d'entraînement 9.2 Principes et éléments de base de commande 9.3 Commandes pneumatiques 9.4 Commandes électropneumatiques 9.5 Commandes hydrauliques
<b>Montage des systèmes techniques</b>	<b>Projet : Engrenages coniques</b> ..... 666
Montage des systèmes techniques partiels et création des plans de montage. Montage des sous-groupes. Réalisation d'un contrôle fonctionnel et création d'un procès-verbal d'essai. Grandeurs caractéristiques de résistance.	1.5 Tolérances et ajustements 1.7 Contrôle de la forme et de la position 3.9 Liaison 6.4 Unités fonctionnelles pour l'appui et le soutien 5.11 Essais des matériaux 10.5 Documentation des documents techniques
Documentation et présentation des résultats de travail.	
<b>Programmation et fabrication sur les machines-outils à commande numérique</b>	<b>Projet : Arbre de transmission et les chapeaux de palier</b> ..... 668
Fabrication de composants sur des machines-outils à commande numérique. Création de plans de travail et d'outil.	4.1 Commandes CNC pour machines-outils 4.1.2 Coordonnées, points d'origine et points de référence 4.1.3 Types de commande, correcteurs d'outils 4.1.4 Création des programmes CNC selon ISO 4.1.5 Cycles et sous-programmes 4.1.6 Programmation de tours CNC 4.1.7 Programmation de fraiseuses CNC 4.6 Niveaux d'automatisation des installations de fabrication 2.3 Exigences de qualité 2.4 Caractéristiques de qualité et défauts
Mise en place de la machine-outils. Développement des programmes CNC.	4.1.2 Coordonnées, points d'origine et points de référence 4.1.3 Types de commande, correcteurs d'outils 4.1.4 Création des programmes CNC selon ISO 4.1.5 Cycles et sous-programmes 4.1.6 Programmation de tours CNC 4.1.7 Programmation de fraiseuses CNC
Développement des plans de contrôle avec les moyens de management de la qualité.	2.7.1 Planification des contrôles 1.2 Bases de la métrologie 1.4 Contrôle des états de surface 1.5 Tolérances et ajustements 1.7 Contrôle de la forme et de la position

Champ d'apprentissage	Informations factuelles dans le livre (exemples)
<b>Remise en état des systèmes techniques</b>	<b>Projet : Broche à moteur d'une fraiseuse CNC . . . . . 670</b>
Planification des mesures de remise en état.	8.5 Analyse de la sécurité et évitement des dommages 8.6 Sollicitation et solidité des éléments de construction 3.9 Liaison
Démontage des systèmes partiels. Analyse et documentation des erreurs.	5.8 Traitement thermique des aciers 5.11 Essais des matériaux 6.4.1 Frottement et lubrifiants 8.3.7 Remise en état 8.3.8 Améliorations 10.5 Documentation des documents techniques
Remplacement et montage des composants défectueux.	
<hr/>	
<b>Fabrication et mise en service des systèmes techniques partiels</b>	<b>Projet : Entraînement d'avance d'une fraiseuse CNC . . . . . 672</b>
Description des relations fonctionnelles des composants et des sous-groupes. Choix des procédés de fabrication et des accessoires de montage appropriés. Assemblage et mise en service des systèmes partiels aux systèmes globaux. Contrôle de la cession.	3.8.11 Brochage 3.8.12 Superfinition 3.9 Liaison  8.2 Mise en service  10.5 Documentation des documents techniques
<hr/>	
<b>Suivi de la qualité des produits et processus</b>	<b>Projet : Niveau bulles d'air . . . . . 674</b>
Réalisation des études de capabilité des machines et des processus. Enregistrement des données de processus et évaluation des grandeurs caractéristiques. Distinction entre les facteurs systématiques et aléatoires. Suivi du processus de production dans la production de masse et en série avec les méthodes de l'assurance de la qualité, documentation du déroulement et déduction des mesures correctives.	2.5 Outils du management de la qualité 2.6 Maîtrise de la qualité 2.7 Assurance de la qualité  2.8 Capabilité des procédés 2.9 Performance des procédés 2.10 Maîtrise statistique des procédés au moyen de cartes de contrôle de la qualité 2.12 Processus d'amélioration continu 10.5 Documentation des documents techniques
<hr/>	
<b>Entretien des systèmes techniques</b>	<b>Projet : Installation de remplissage . . . . . 676</b>
Entretien des systèmes techniques. Recherche des causes d'erreurs. Réalisation d'une analyse des points faibles et choix des procédés de contrôle et des moyens de contrôle.	2.12 Processus d'amélioration continu 2.5 Outils du management de la qualité 8.3 Entretien 8.5 Analyse de la sécurité et évitement des dommages 8.6 Sollicitation et solidité des éléments de construction 8.2.3 Réception de machines ou d'installations 10.3.3.1 Planifier l'organisation du projet 10.3.5 L'achèvement du projet
Remise des systèmes techniques.	
<hr/>	
<b>Assurance de la capacité de fonctionnement des systèmes automatisés</b>	<b>Projet : Automatisation d'un poste de travail manuel . . . . . 678</b>
Analyse des systèmes automatisés et sécurisation de la capacité de fonctionnement. Élimination des pannes, élaboration de stratégies pour l'isolation des pannes et optimisation des processus. Respect de la protection de travail lors du maniement des systèmes de fabrication et de manutention.	2.12 Processus d'amélioration continu 9.6 Automates Programmables Industriels (API) 10.3.2 Phase de définition 10.3.3.1 Planifier l'organisation du projet 10.3.5 L'achèvement du projet

# 1 Métrologie

<b>1.1</b>	<b>Grandeurs et unités</b> .....	13
<b>1.2</b>	<b>Bases de la métrologie</b> .....	15
	Notions de base .....	15
	Erreurs de mesure .....	18
	Capabilité des moyens de contrôle, surveillance des moyens de contrôle .....	21
<b>1.3</b>	<b>Moyens de contrôle des longueurs</b> .....	23
	Cales étalons et formes étalons .....	23
	Instruments de mesure mécaniques et électroniques .....	26
	Instruments de mesure pneumatiques, électroniques .....	34
	Instruments de mesure optoélectroniques .....	37
	Instruments de mesure des coordonnées .....	39
	Machine de mesure tridimensionnelle (MMT) ..	40
<b>1.4</b>	<b>Contrôle des états de surfaces</b> .....	43
	Profil des surfaces .....	43
	Paramètres; procédés de contrôle des surfaces ..	44
<b>1.5</b>	<b>Tolérances et ajustements</b> .....	47
	Tolérances .....	47
	Ajustements .....	51
<b>1.6</b>	<b>Spécifications géométriques du produit (GPS)</b> ..	55
<b>1.7</b>	<b>Contrôle de la forme et de la position</b> .....	58
	Tolérances de forme et de position .....	58
	Contrôle des surfaces planes et inclinées .....	60
	Contrôle de la circularité, de la coaxialité et du battement .....	63
	Contrôle des filetages; contrôle de la conicité ..	68
<b>1.8</b>	<b>Practise your English</b> .....	71

## 2 Management de la qualité

<b>2.1</b>	<b>Domaines de travail du MQ</b> .....	72
<b>2.2</b>	<b>La série de normes EN ISO 9000</b> .....	73
<b>2.3</b>	<b>Exigences de qualité</b> .....	73
<b>2.4</b>	<b>Caractéristiques de qualité et défauts</b> .....	74
<b>2.5</b>	<b>Outils du management de la qualité</b> .....	75
<b>2.6</b>	<b>Maîtrise de la qualité</b> .....	78
<b>2.7</b>	<b>Assurance de la qualité</b> .....	79
<b>2.8</b>	<b>Capabilité des procédés</b> .....	83
<b>2.9</b>	<b>Performance des procédés</b> .....	86
<b>2.10</b>	<b>Maîtrise statistique des procédés au moyen de cartes de contrôle de la qualité</b> ..	87
<b>2.11</b>	<b>Audit et certification</b> .....	90
<b>2.12</b>	<b>Processus d'amélioration continu: les collaborateurs optimisent les procédés</b> ...	91
<b>2.13</b>	<b>Practise your English</b> .....	92



# 1 Métrologie

## 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 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 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° 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 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 57,29577951°.

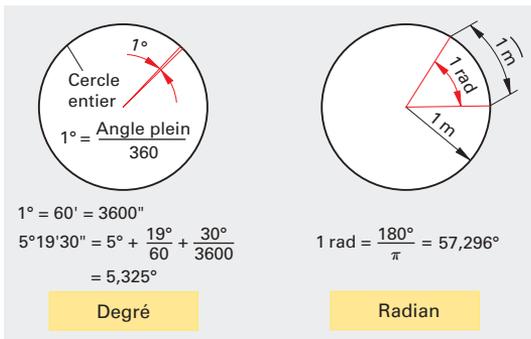


Fig. 2: Unités angulaires

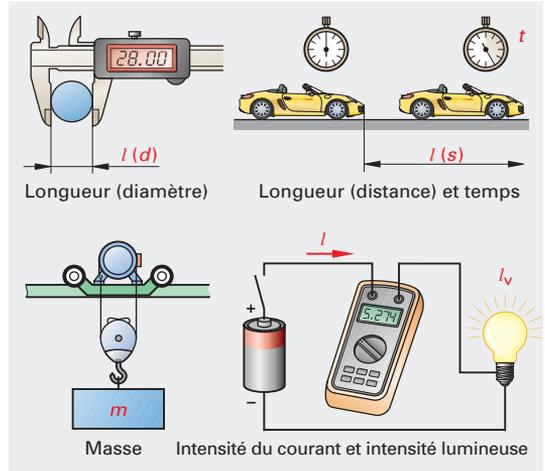


Fig. 1: Grandeurs de base

Tableau 1: Système international d'unités

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

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

Préfixe	Facteur	
M méga	multiplié par un million	10 <sup>6</sup> = 1 000 000
k kilo	multiplié par mille	10 <sup>3</sup> = 1000
h hecto	multiplié par cent	10 <sup>2</sup> = 100
da déca	multiplié par dix	10 <sup>1</sup> = 10
d déci	divisé par dix	10 <sup>-1</sup> = 0,1
c centi	divisé par cent	10 <sup>-2</sup> = 0,01
m milli	divisé par mille	10 <sup>-3</sup> = 0,001
μ micro	divisé par un million	10 <sup>-6</sup> = 0,000 001

Tableau 3: Unités de longueur courantes

Système métrique	
1 kilomètre (km)	= 1000 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 **masse**  $m$  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:  $1 \text{ g} = 0,001 \text{ kg}$ ,  $1 \text{ t} = 1000 \text{ kg}$ .

Un cylindre en platine iridié qui est conservé à Paris est l'étalon international pour la masse de  $1 \text{ kg}$ . 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  $0^\circ\text{C}$ , le point d'ébullition de l'eau est de  $100^\circ\text{C}$ .

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

## ■ Temps, fréquence et fréquence de rotation

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

Unités:  $1 \text{ s} = 1000 \text{ ms}$ ;  $1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$

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 effectués par seconde ou par minute.

**Exemple:** Une meule d'un diamètre de  $200 \text{ mm}$  exécute  $6000$  tours en  $2 \text{ min}$ .

Quelle est sa fréquence de rotation?

Solution: Fréquence de rotation  $n = \frac{6000}{2 \text{ min}} = 3000/\text{min}$

## ■ Formules

Les formules établissent des rapports entre les grandeurs.

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

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

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.  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ .

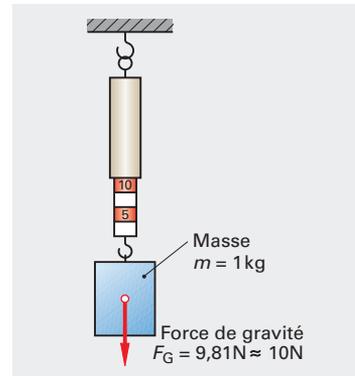


Fig. 1: Masse et force

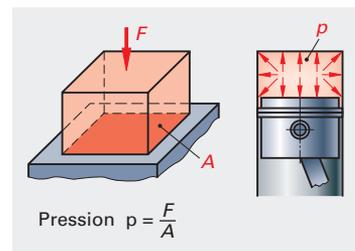


Fig. 2: Pression

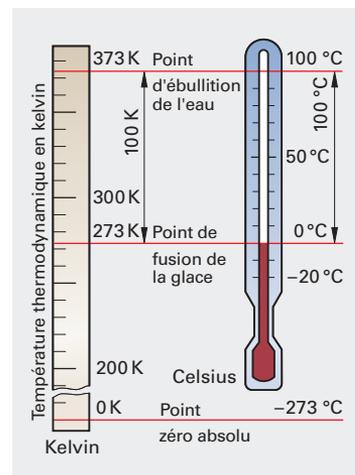


Fig. 3: Échelles de température

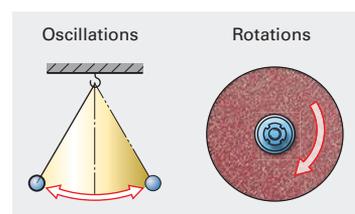


Fig. 4: Processus périodiques

## 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 équipements de mesure, c'est-à-dire avec des instruments de mesure et des moyens auxiliaires (fig. 1 et 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.

#### ■ Équipements de mesure

Les équipements de mesure comprennent les **instruments de mesure** et les **moyens auxiliaires** respectifs (équipements nécessaires en plus).

Tous les instruments de mesure à affichage 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. les colonnes de mesure et les prismes, mais aussi les amplificateurs et convertisseurs de signaux de mesure.

#### ■ 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 (tableau, p. suivante).

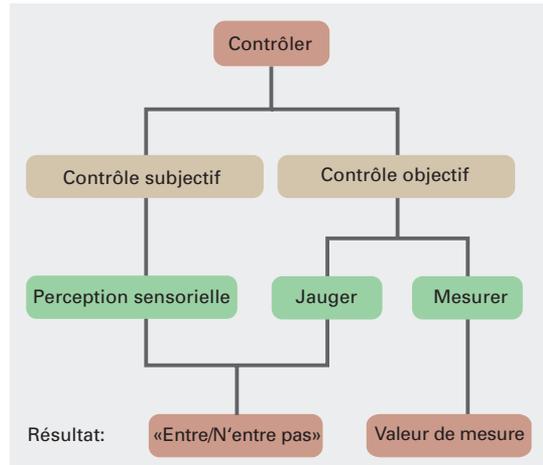


Fig. 1: Types de contrôle et résultat du contrôle

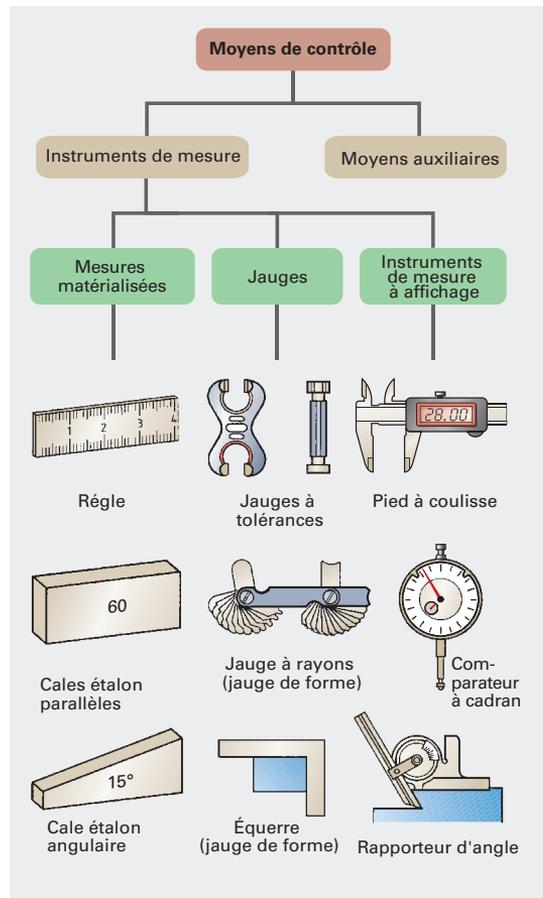


Fig. 2: Équipements de mesure

Tableau 1 : Notions techniques de mesure

Terme	Abréviation	Définition, explication	Exemple, formules
<b>Le mesurande</b>	$M$	Grandeur physique soumise à une mesure, par ex. un diamètre ou la distance entre les axes des alésages.	
<b>Indication</b>	-	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 $D_{af} = 0,01\text{mm}$   Affichage numérique $D_{num} = 0,01\text{mm}$
Indication de l'échelle	-	Affichage continu sur une échelle avec repères	
Indication numérique	-	Affichage numérique sur une échelle à chiffres	
<b>Résolution d'affichage*</b>	$D_{af}$ ou $\rightarrow\leftarrow$	La valeur d'une division est égale à la différence entre les valeurs de mesure correspondant à deux repères consécutifs. La division $D_{af}$ est indiqué dans l'unité figurant sur l'échelle.	
<b>Résolution d'affichage numérique</b>	$D_{num}$	Correspond au pas d'une échelle numérique.	
<b>Valeur mesurée</b>	$x_a$ $x_1, x_2 \dots$	La valeur mesurée est affichée par un instrument, elle est composée de la valeur vraie et des écarts de mesure aléatoires et systématiques.	La valeur vraie $x_w$ est une « évaluation » déterminée à l'issue de nombreux mesurages répétitifs et corrigée des écarts systématiques connus.  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.
Moyenne	$\bar{x}$	La moyenne $\bar{x}$ résulte en général de cinq mesures répétitives.	
Valeur vraie	$x_w$		
Valeur correcte	$x_r$		
<b>Résultat de mesure non corrigé</b>	$x_a$ $x_1, x_2 \dots$  $\bar{x}$	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 mesurage unique en raison des écarts de mesure aléatoires ainsi qu'en raison des écarts de mesure systématiques inconnus.	
<b>Erreur de mesure systématique</b>	$A_s$	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 $x_r$ (p. 15).	$A_s = x_a - x_r$ ( $A_s = \bar{x}_a - x_r$ )
<b>Valeur de correction</b>	$K$	Compensation d'écarts systématiques connus, par ex. écart de température	$K = -A_s$ ( $K = K_1 + K_2 \dots + K_n$ )
<b>Incertitude de mesure*</b>	$u$	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.	
<b>Résultat de mesure corrigé</b>	$y$	Valeur de mesure, corrigée d'écarts de mesure systématiques connus ( $K$ - correction)	
<b>Résultat de mesure complet</b>	$Y$	Le résultat de la mesure $Y$ est la valeur vraie pour le mesurande $M$ . Il inclut l'incertitude de mesure élargie $U$ .	$Y = y \pm U$ ( $Y = \bar{x} + K \pm U$ )

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

**Tableau 1 : Notions techniques de mesure**

Terme	Abréviation	Définition, explication	Exemple, formules
<b>Fidélité (répétabilité)*</b>  Fidélité* (répétabilité) Limite	$f_w$  $r$	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.  La limite de répétition est la différence pour deux valeurs de mesurages uniques alors que la probabilité est de 95%.	<p>Cale étalon ou pièce à usiner</p>
<b>Hystérésis de mesure*</b>	$f_u$	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).  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>Affichage montant Affichage descendant Tige de mesure rentrante Tige de mesure sortante</p>
<b>Champ d'erreur d'indication*</b>  Champ d'erreur d'indication total	$f_e$  $f_{ges}$	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.  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>— Tige de mesure sortante — Tige de mesure rentrante</p>
<b>Erreurs maximales tolérées*</b>	$G$	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. $G_0 = G_u = 20 \mu m$	
<b>Étendue de mesure*</b>	$Meb$	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.	
<b>Champ de mesure</b>	$Mes$	Le champ de mesure est la différence entre la valeur finale et la valeur initiale de l'étendue de la mesure.	
<b>Étendue d'indication</b>	$Az$	L'étendue d'indication est comprise entre la plus grande et la plus petite valeur d'un instrument de mesure.	<p>Course libre Étendue d'indication Champ de mesure Butée inférieure Course de mesure</p>

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

## 1.2.2 Erreurs de mesure

### ■ Causes des erreurs de mesure

(tableau 1, p. suivante)

L'écart à la température de référence de 20°C cause toujours des erreurs 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 erreurs de mesure, il faut que l'affichage d'un instrument de mesure soit réglé dans les conditions dans lesquelles les pièces sont mesurées.

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

### ■ Types d'erreurs

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

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

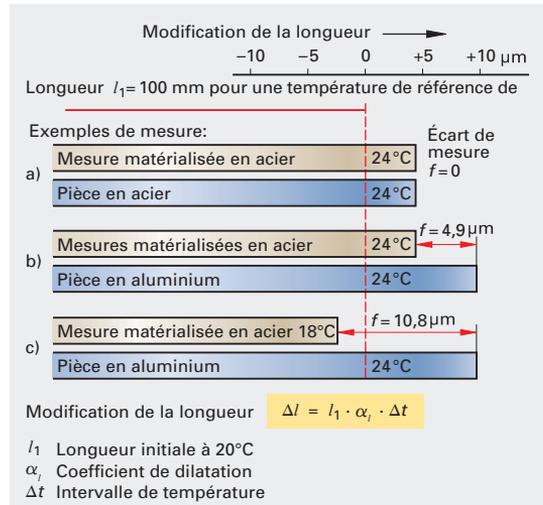


Fig. 1: Écarts de mesure résultant de la température

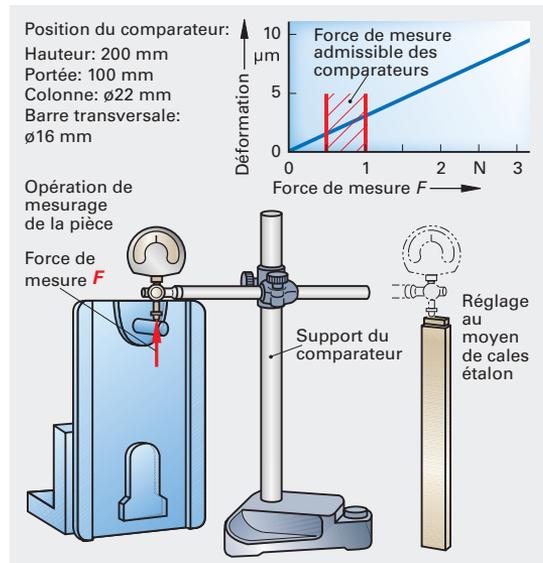


Fig. 2: Erreurs de mesure consécutifs à une déformation élastique sur le support du comparateur, résultant de la force de mesure

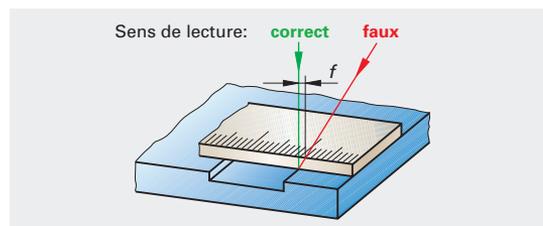
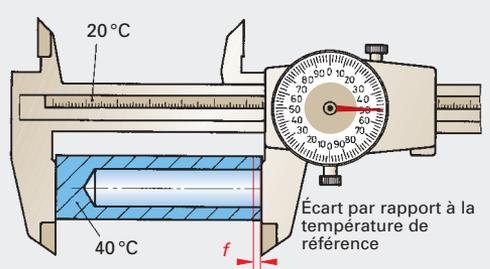
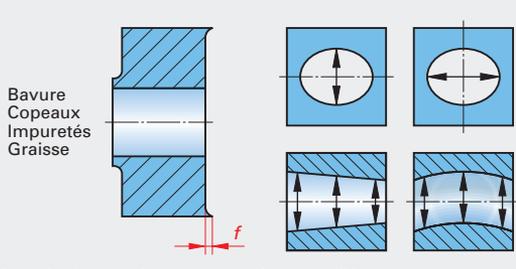
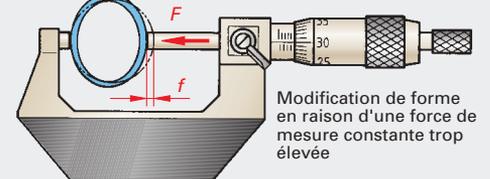
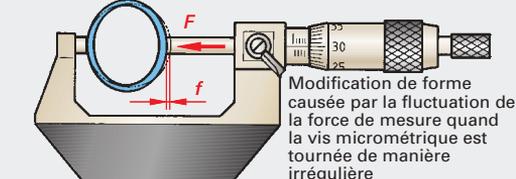
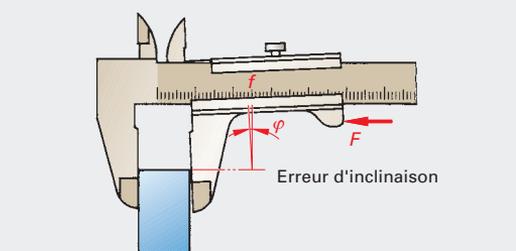
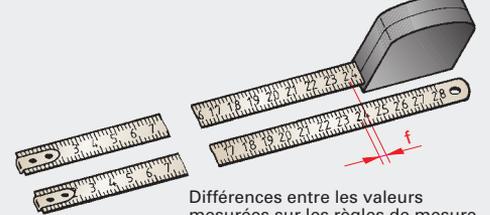
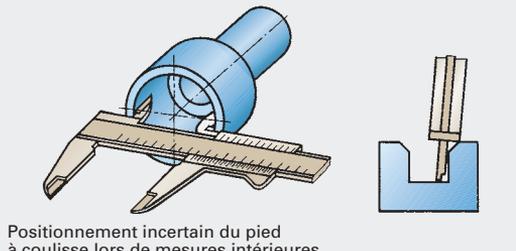
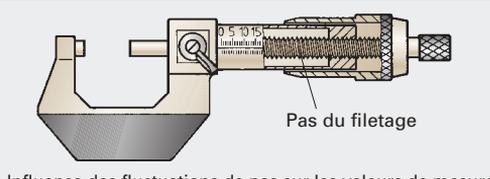
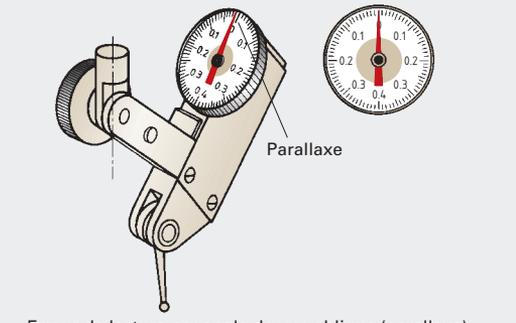
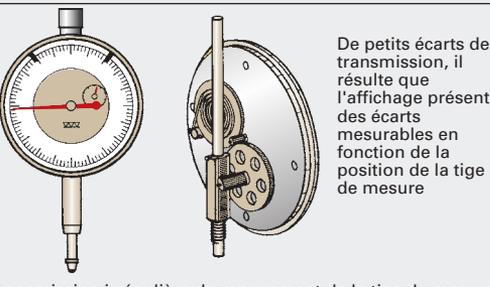


Fig. 3: Erreurs de parallaxe

**Tableau 1 : Causes et types d'erreurs de mesure**

Erreurs de mesure systématiques	Erreurs 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>Erreurs 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 **erreurs systématiques** peuvent être constatés par un **mesurage comparatif** avec des instruments de mesure ou des cales étalon précis.

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'**erreur 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 erreurs de mesure d'un micromètre d'extérieur sur l'étendue d'indication de 0 mm à 25 mm, on obtient le diagramme des erreurs 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 erreurs 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'erreurs 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 erreurs de circularité influencent la dispersion de la mesure, il convient de mesurer toujours au même endroit.

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

Les erreurs aléatoires peuvent être déterminés par des mesures répétitives.

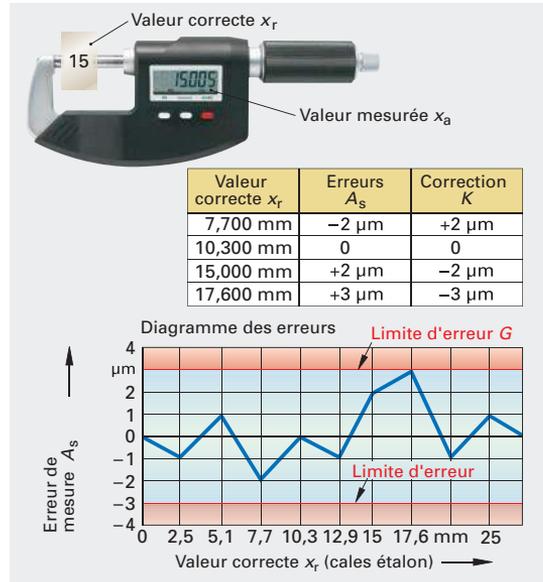


Fig. 1: Erreurs systématiques d'un micromètre d'extérieur

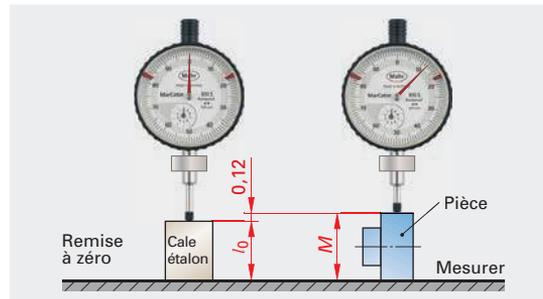


Fig. 2: Mise à zéro de l'affichage et mesure par comparaison

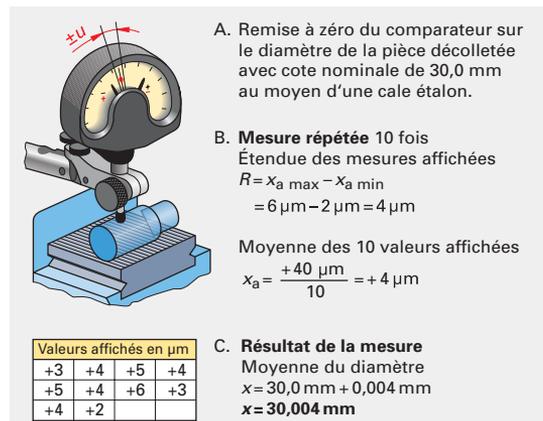


Fig. 3: Erreurs aléatoires d'un comparateur pour les mesures effectuées dans des conditions de répétabilité