



Techniques de la mécanique

2ème édition

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

N° Europa: 11664

Titre original: Fachkunde Metall (57ème édition 2013)

Auteurs:

Bartenschlager, Jörg	Directeur	D-Rheinbreitbach
Dillinger, Josef	Directeur hors classe	D-Munich
Escherich, Walter	Directeur hors classe	D-Munich
Günter, Werner	Ingénieur diplômé (Dipl.-Ing.)	D-Oberwolfach
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	Professeur principal	D-Ottobeuren
Wieneke, Falko	Ingénieur diplômé (Dipl.-Ing.)	D-Essen

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

Techniques de la mécanique

Relecture:

Caquereau Jacques, EPT, CH-Sion
 Carrera Miguel, EPT, CH-Sion
 Frédéric Grand, EPT, 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, EPT, 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 664)

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

2ème édition 2015

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 978-3-8085-1179-4

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.

© 2015 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

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
- Contremâtres et techniciens/nes
- Stagiaires et étudiants/tes

Contenu

Le contenu de ce livre est articulé sur dix 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.

Enseignement par champs d'apprentissage

Les plans d'études cadres ciblés par champ d'apprentissage nécessitent des formes concrètes d'enseignement à travers lesquelles l'apprenti peut transférer les connaissances acquises dans la pratique opérationnelle. L'acquisition de cette capacité est disponible en treize champs d'apprentissage, avec pour chacun d'eux un projet pilote avec une proposition d'application.

CD

Ce livre contient un CD avec toutes les images.

Dans cette édition, les éléments suivants ont été ajoutés ou mis à jour:

- Technique de production : Procédés de fabrication additifs ; brochage
- Technique d'automatisation : Modules de temporisation, technologie du vide et îlots de vannes ; technologie proportionnelle.
- Fabrication automatisée :
 - Tournage: Processus de programmation selon Siemens et PAL. Outils entraînés selon PAL.
 - Fraisage: Processus de programmation selon Heidenhain et PAL.
 - Usinage 5 axes selon PAL
- Planifier, élaborer, documenter et présenter les projets techniques dans la formation et la profession.
- A chaque chapitre, une page en anglais pour s'entraîner et approfondir.

Les auteurs et l'éditeur sont reconnaissants envers tous les utilisateurs du « Techniques de la mécanique » pour leurs remarques critiques et leurs suggestions d'amélioration.

Décembre 2014

Les auteurs

1 Métrologie 2 Management de la qualité

12 ... 87

3 Technique de fabrication

88 ... 259

4 Technique des matériaux

260 ... 340

5 Technique des machines 6 Électrotechnique

341 ... 436

7 Montage, mise en service, entretien

437 ... 475

8 Technique de commande

476 ... 562

9 Fabrication automatisée 10 Projets techniques

563 ... 636

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.

Champ d'apprentissage	Informations factuelles dans le livre (exemples)
Fabrication de composants avec des outils à main Préparation et fabrication des composants professionnels avec des outils à main. Création et modification des dessins pour sous-groupes simples.	Projet : Porte-clés 638 3.6.2 Fabrication avec des outils à main 1.2 Bases de la métrologie 1.2.1 Notions de base 1.2.2 Écarts de mesure 1.2.3 Capabilité des moyens de mesure 1.3 Moyens de contrôle des longueurs 1.5 Tolérances
Planification des étapes de travail avec des outils et des matériaux et mise en œuvre des calculs. Sélection, application des moyens de contrôle appropriés et contrôle des résultats. Détermination approximative des coûts de fabrication.	2.7.1 Planification des contrôles 3.2 Les différents procédés de fabrication 3.4.1 Comportement des matériaux 3.4.2 Procédés de formage 3.4.3 Déformation plastique par flexion 3.5 Coupe 3.5.1 Cisaillage 4.1 Aperçu des matériaux et des matières auxiliaires 4.2 Choix et propriétés des matériaux 4.4 Aciers et matériaux de fonte 4.5 Métaux NF 4.9 Matières plastiques 4.10 Matériaux composites
Documentation et présentation des résultats de travail. Respect des dispositions en matière de sécurité au travail et de protection de l'environnement.	10.5 Documentation des projets techniques 3.1 Sécurité au travail 3.11 Atelier de fabrication et protection de l'environnement 4.12 Problèmes environnementaux des matériaux et matières auxiliaires
Fabrication de composants avec des machines Evaluation des dessins et des listes de pièces. Choix des matériaux selon les propriétés spécifiques. Planification du déroulement de la fabrication avec des calculs.	Projet : Dispositif de serrage pour pièces rondes 640 5.6 Unités d'entraînement 5.5 Unités fonctionnelles pour la transmission d'énergie 1.4 Contrôle des états de surface 1.5 Tolérances et ajustements 3.7 Fabrication avec des machines-outils 3.8 Liaison 4.4 Aciers et matériaux en fonte de fer 5.6 Unités d'entraînement 5.5 Unités fonctionnelles pour la transmission d'énergie
Conception et fonctionnement des machines. Utilisation des outils.	5.1 Classification des machines 5.2 Unités fonctionnelles des machines 3.7.1 Matériaux de coupe
Choix et utilisation des moyens de contrôle.	1.2 Bases de la métrologie 1.2.1 Notions de base

Champ d'apprentissage	Informations factuelles dans le livre (exemples)
<p>Documentation et présentation des résultats de travail.</p> <p>Respect des dispositions en matière de sécurité au travail et de protection de l'environnement.</p>	<p>1.2.2 Écarts de mesure 1.2.3 Capabilité des moyens de mesure 1.3 Moyens de contrôle des longueurs 2 Management de la qualité 2.3 Exigences de qualité 2.4 Caractéristiques de qualité et défauts 2.7.1 Planification des contrôles</p> <p>10.5 Documentation des projets techniques</p> <p>3.1 Sécurité au travail 3.11 Atelier de fabrication et protection de l'environnement 4.12 Problèmes environnementaux des matériaux et matières auxiliaires</p>
Fabrication de sous-groupes simples	Projet : Perceuse à colonne pour perceuse à main 642
<p>Lecture et compréhension de dessins de groupes et de schémas de connexion. Planification de commandes simples. Montage de sous-groupes. Marquage de pièces conformes à la norme.</p> <p>Distinction du procédé d'assemblage. Choix des outils et des pièces normalisées.</p> <p>Documentation et présentation des résultats de travail.</p>	<p>5.1 Classification des machines 5.4 Unités fonctionnelles des machines 5.6 Unités d'entraînement 5.5 Unités fonctionnelles pour la transmission d'énergie 8.3.3 Schémas de connexion des commandes pneumatiques 8.3.4 Projet de schéma de connexion systématique 8.3.5 Grafset</p> <p>3.8 Liaison 4.4 Aciers et matériaux en fonte de fer</p> <p>2 Management de la qualité 2.1 Domaines de travail du MQ 2.2 Normes MQ 2.3 Exigences de qualité 2.4 Caractéristiques de qualité et défauts</p> <p>10.1.1 Organisation du travail en ligne et en projet 10.5.1 Traitement de texte 10.5.2 Tableur 10.5.3 Logiciel de visualisation 10.5.4 Communication technique</p>
<p>Respect des dispositions en matière de sécurité au travail et de protection de l'environnement.</p>	<p>3.1 Sécurité au travail 3.11 Atelier de fabrication et protection de l'environnement 4.12 Problèmes environnementaux des matériaux et matières auxiliaires</p>
Entretien des systèmes techniques	Projet : Entretien d'une perceuse à colonne 644
<p>Évaluation des mesures de maintenance</p> <p>Planification des travaux d'entretien, détermination des outils et des matières auxiliaires.</p>	<p>1 Métrologie 1.1 Grandeur et unités 7.3 Entretien 7.4 Corrosion et protection anticorrosion 7.5 Analyse et prévention des dégâts 7.6 Sollicitation et résistance des composants</p> <p>4.1.3 Matières auxiliaires et énergie 5.6 Unités d'entraînement 5.5 Unités fonctionnelles pour la transmission d'énergie 7.3.6 Lubrifiants 7.3.7 Inspection</p>
<p>Documentation et présentation des résultats de travail.</p>	<p>10.5 Documentation des projets techniques</p>
<p>Respect des dispositions en matière de sécurité au travail et de protection de l'environnement.</p>	<p>3.1 Sécurité au travail 3.11 Atelier de fabrication et protection de l'environnement 4.12 Problèmes environnementaux des matériaux et matières auxiliaires</p>

Champ d'apprentissage	Informations factuelles dans le livre (exemples)
Fabrication de pièces distinctes avec des machines-outils	Projet : Élément de serrage hydraulique 646 Fabrication de pièces à partir de différents matériaux sur des machines-outils. 3.7 Fabrication avec des machines-outils 4.4.3 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 1.6 Contrôle de la forme et de la position Recuit, trempe, trempe et revenu. 4.4 Aciers et matériaux en fonte de fer 2.4 Caractéristiques de qualité et défauts 2.7.1 Planification des contrôles 4.8 Traitement thermique des aciers
Installation et mise en service des systèmes de technique de régulation	Projet : Séparation des différentes billes en métal 648 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. 5.1 Classification des machines 10.3 Elaboration de projets en phases 5.6 Unités d'entraînement 8.2 Bases et éléments de base de commande 8.3 Commandes pneumatiques 8.4 Commandes électropneumatiques 8.5 Commandes hydrauliques
Montage des systèmes techniques	Projet : Engrenages coniques 650 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. 4.11 Essai du matériau Documentation et présentation des résultats de travail. 10.5 Documentation des projets techniques
Programmation et fabrication sur les machines-outils à commande numérique	Projet : Arbre de transmission et les chapeaux de palier 652 Fabrication de composants sur des machines-outils à commande numérique. Création de plans de travail et d'outil. 9.1 Commandes CNC 9.1.2 Coordonnées, points zéro et points de référence 9.1.3 Mesure de l'outil et corrections 9.1.4 Principes de la programmation CNC 9.1.5 Cycles et sous-programmes 9.1.6 Programmation des tours à commande numérique 9.1.7 Programmation des fraiseuses CNC 9.2 Installations de fabrication automatisées 2.3 Exigences de qualité 2.4 Caractéristiques de qualité et défauts Mise en place de la machine-outils. Développement des programmes CNC. 9.1.2 Coordonnées, points zéro et points de référence 9.1.3 Mesure de l'outil et corrections 9.1.4 Principes de la programmation CNC 9.1.5 Cycles et sous-programmes 9.1.6 Programmation des tours à commande numérique 9.1.7 Programmation des 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 1.6 Contrôle de la forme et de la position

Champ d'apprentissage	Informations factuelles dans le livre (exemples)
Remise en état des systèmes techniques	Projet : Moteur de broche d'une fraiseuse CNC 654
Planification des mesures de remise en état.	7.5 Analyse et prévention des dégâts 7.6 Sollicitation et résistance des composants 3.8 Liaison
Démontage des systèmes partiels. Analyse et documentation des erreurs.	4.8 Traitement thermique des aciers 4.11 Essai du matériau 5.4.1 Frottement et lubrifiants 7.3.6 Lubrifiants 7.3.8 Remise en état 7.3.9 Améliorations 10.5 Documentation des projets techniques
Remplacement et montage des composants défectueux.	
Fabrication et mise en service des systèmes techniques partiels	Projet : Entraînement d'avance d'une fraiseuse CNC 656
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.	3.7.10 Brochage 3.7.11 Superfinition 3.8 Liaison 7.2 Mise en service 10.5 Documentation des projets techniques
Suivi de la qualité des produits et processus	Projet : Niveau à bulle 658
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 machines 2.9 Capabilité des procédés 2.10 Contrôle statistique des procédés avec cartes de contrôle de la qualité 2.12 Processus d'amélioration continu 10.5 Documentation des projets techniques
Entretien des systèmes techniques	Projet : Installation de remplissage 660
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. Remise des systèmes techniques.	2.12 Processus d'amélioration continu 2.5 Outils du MQ 7.3 Entretien 7.5 Analyse et prévention des dégâts 7.6 Sollicitation et résistance des composants 7.2.3 Enlèvement des machines ou installations 10.3.3.1 Organisation du projet 10.3.5 Achèvement du projet
Assurance de la capacité de fonctionnement des systèmes automatisés	Projet : Automatisation d'un poste de travail manuel 662
Analyse des systèmes automatisés et sécurisation de la capacité de fonctionnement. Elimination 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 8.6 Commandes programmables 8.7 Technique de manutention dans l'automatisation 10.3.2 Phase de définition 10.3.3.1 Organisation du projet 10.3.5 Achèvement du projet

Sommaire

1 Métrologie

1.1	Grandeurs et unités	13	1.4	Contrôle des états de surfaces	41
1.2	Bases de la métrologie	15	1.4.1	Profil des surfaces	41
1.2.1	Notions de base	15	1.4.2	Paramètres d'état de surface	42
1.2.2	Ecart de mesure	18	1.4.3	Procédés de contrôle des surfaces	43
1.2.3	Capacité des moyens de contrôle, surveillance des moyens de contrôle	21	1.5	Tolérances et ajustements	45
1.3	Moyens de contrôle des longueurs	23	1.5.1	Tolérances	45
1.3.1	Règles de mesure, jauge et cales étalon	23	1.5.2	Ajustements	49
1.3.2	Instruments de mesure mécaniques et électroniques	26	1.6	Contrôle de la forme et de la position	53
1.3.3	Instruments de mesure pneumatiques	34	1.6.1	Tolérances de forme et de position	53
1.3.4	Instruments de mesure électroniques	36	1.6.2	Contrôle des surfaces planes et inclinées	55
1.3.5	Instruments de mesure optoélectroniques	37	1.6.3	Contrôle de la circularité, de la coaxialité et du battement	58
1.3.6	Technique multicapteurs dans des instruments de mesure des coordonnées	39	1.6.4	Contrôle des filetages	63
			1.6.5	Contrôle de la conicité	65
			1.7	Practice your English	66

2 Management de la qualité

2.1	Domaines de travail du MQ	67	2.9	Performance des procédés	81
2.2	La série de normes EN ISO 9000	68	2.10	Maîtrise statistique des procédés au moyen de cartes de contrôle de la qualité	82
2.3	Exigences de qualité	68	2.11	Audit et certification	85
2.4	Caractéristiques de qualité et défauts	69	2.12	Processus d'amélioration continu: les collaborateurs optimisent les procédés	86
2.5	Outils du management de la qualité	70	2.13	Practice your English	87
2.6	Maîtrise de la qualité	73			
2.7	Assurance de la qualité	74			
2.8	Capacité des procédés	78			

3 Technique de fabrication

3.1	Sécurité au travail	89	3.7.5	Fraisage et chanfreinage de trous	148
3.2	Les différents procédés de fabrication	91	3.7.6	Alésage	149
3.3	Moulage	93	3.7.7	Tournage	151
3.3.1	Moules et modèles	93	3.7.8	Fraisage	171
3.3.2	Moulage en moules perdus	94	3.7.9	Rectification	188
3.3.3	Moulage en moules permanents	97	3.7.10	Brochage	200
3.3.4	Matériaux de moulage	98	3.7.11	Superfinition	202
3.3.5	Défauts de coulée	98	3.7.12	Enlèvement par électro-érosion	208
3.3.6	Formage des matières plastiques	99	3.7.13	Dispositifs et éléments de serrage sur des machines-outils	212
3.3.7	Mise en forme des produits semi-finis et finis .	104	3.7.14	Exemple de fabrication d'une bride de serrage	219
3.4	Formage	106	3.8	Liaison	223
3.4.1	Comportement des matériaux lors du formage	106	3.8.1	Procédé de liaison	223
3.4.2	Procédés de formage	106	3.8.2	Assemblage par sertissage et par enclenchement	226
3.4.3	Déformation plastique par flexion	107	3.8.3	Collage	228
3.4.4	Déformation plastique par traction et compression	110	3.8.4	Brasage	230
3.4.5	Déformation plastique par compression	114	3.8.5	Soudage	236
3.4.6	Presses	116	3.9	Procédés de fabrication additifs	249
3.5	Coupe	117	3.9.1	Prototypage rapide	249
3.5.1	Cisaillage	117	3.9.2	Outilage rapide	251
3.5.2	Découpage sans contact	122	3.9.3	Fabrication rapide	251
3.6	Usinage par enlèvement de copeaux	126	3.10	Enduction	252
3.6.1	Bases	126	3.11	Atelier de fabrication et protection de l'environnement	256
3.6.2	Fabrication avec des outils à main	127	3.12	Practice your English	259
3.7	Fabrication avec des machines-outils	131			
3.7.1	Matériaux de coupe	131			
3.7.2	Lubrifiants réfrigérants	135			
3.7.3	Sciage	138			
3.7.4	Perçage, taraudage, fraisage, alésage	139			

4 Technique des matériaux

4.1 Aperçu des matériaux et des matières auxiliaires	261	4.8.1 Types de structure des matériaux ferreux	300
4.2 Choix et propriétés des matériaux	263	4.8.2 Diagramme de phases fer-carbone.	301
4.3 Structure interne des métaux	269	4.8.3 Structure en cas d'augmentation de la température	302
4.3.1 Structure interne, propriétés	269	4.8.4 Le recuit	303
4.3.2 Types de mailles dans les métaux	270	4.8.5 Trempe	304
4.3.3 Défaut structurel dans le cristal	271	4.8.6 Amélioration	308
4.3.4 Formation de la structure du métal.	271	4.8.7 Durcissement de surface	309
4.3.5 Types de structure et propriétés du matériau	272	4.8.8 Exemple de fabrication: traitement thermique d'une griffe de serrage	312
4.3.6 Structure des métaux purs et structure des alliages	273	4.9 Matières plastiques	313
4.4 Aciers et matériaux de fonte de fer	274	4.9.1 Propriétés et utilisation	313
4.4.1 Production de la fonte de première fusion	274	4.9.2 Composition chimique et fabrication	314
4.4.2 Production de l'acier	275	4.9.3 Classification technologique et structure interne	315
4.4.3 Système de désignation des aciers	278	4.9.4 Thermoplastes	316
4.4.4 Classification des aciers selon leur composition et leurs classes de qualité	281	4.9.5 Duroplastes	318
4.4.5 Les nuances d'acier et leur utilisation	282	4.9.6 Elastomères	319
4.4.6 Formes commerciales des aciers	284	4.9.7 Valeurs caractéristiques des matières plastiques	319
4.4.7 Éléments d'alliage et résiduels des aciers et des matériaux en fonte de fer	285	4.10 Matériaux composites	321
4.4.8 Production des matériaux en fonte de fer	286	4.11 Essais des matériaux	326
4.4.9 Le système de désignation des matériaux en fonte de fer	287	4.11.1 Essai des propriétés technologiques	326
4.4.10 Types de matériaux en fonte de fer	288	4.11.2 Contrôle des propriétés mécaniques	327
4.4.11 Comparaison entre la teneur en carbone des aciers et celle des métaux ferreux de fonderie	290	4.11.3 Essai de résilience	329
4.5 Métaux non ferreux (métaux NF)	291	4.11.4 Essais de dureté	330
4.5.1 Métaux légers	291	4.11.5 Essai de fatigue	334
4.5.2 Métaux lourds	293	4.11.6 Essai de charge en fonctionnement	335
4.6 Matériaux frittés	296	4.11.7 Essais non destructifs	335
4.7 Matériaux en céramique	298	4.11.8 Contrôles métallographiques	336
4.8 Traitements thermiques des aciers	300	4.11.9 Essais sur les matières plastiques	337
		4.12 Problèmes environnementaux causés par les matériaux et les matières auxiliaires	338
		4.13 Practice your English	340

5 Technique des machines

5.1 Classification des machines	342	5.4.2 Paliers à glissement	378
5.2 Unités fonctionnelles des machines et appareils	350	5.4.3 Guidages	387
5.2.1 Structure interne de machines	350	5.4.4 Joints d'étanchéité	390
5.2.2 Unités fonctionnelles d'une machine-outil CNC	352	5.4.5 Ressorts	392
5.2.3 Unités fonctionnelles d'une climatisation	354	5.5 Unités fonctionnelles pour la transmission d'énergie	394
5.2.4 Dispositifs de sécurité sur des machines	355	5.5.1 Arbres et axes	394
5.3 Unités fonctionnelles pour l'assemblage	357	5.5.2 Accouplements	396
5.3.1 Filetage	357	5.5.3 Entraînements par courroie	401
5.3.2 Assemblages par vis	359	5.5.4 Entraînements par chaîne	403
5.3.3 Assemblages par goupilles	367	5.5.5 Entraînements par roues dentées	405
5.3.4 Assemblages par rivets	369	5.6 Unités d'entraînement	408
5.3.5 Liaisons arbre – moyeu	371	5.6.1 Moteurs électriques	408
5.4 Unités fonctionnelles pour l'appui et le soutien	375	5.6.2 Transmission	415
5.4.1 Frottement et lubrifiants	375	5.6.3 Entraînements pour des mouvements rectilignes (entraînements linéaires)	421
		5.7 Practice your English	423

6 Electrotechnique

6.1 Circuit électrique	424	6.7 Mesures de protection en machines électriques	433
6.2 Couplage des résistances	427	6.8 Conseils à propos de l'utilisation d'appareils électriques	435
6.3 Types de courant	429	6.9 Practice your English	436
6.4 Puissance électrique et énergie électrique	430		
6.5 Dispositifs de protection contre les surintensités	431		
6.6 Défaillances sur des installations électriques	432		

7 Montage, mise en service, entretien

7.1	Technique de montage	438	7.3.5	Entretien.....	456
7.1.1	Planification du montage.....	438	7.3.6	Inspection.....	459
7.1.2	Formes d'organisation du montage.....	439	7.3.7	Remise en état.....	461
7.1.3	Automatisation du montage.....	439	7.3.8	Améliorations.....	463
7.1.4	Exemples de montage.....	440	7.3.9	Détection de défauts et de sources d'erreurs.....	464
7.2	Mise en service	446	7.4	Corrosion et protection contre la corrosion	465
7.2.1	Implantation de machines ou d'installations.....	447	7.4.1	Causes de corrosion.....	465
7.2.2	Mise en service de machines ou d'installations	448	7.4.2	Types de corrosion et leur aspect.....	467
7.2.3	Réception de machines ou d'installations.....	450	7.4.3	Mesures de protection anticorrosion.....	468
7.3	Maintenance	451	7.5	Analyse et prévention des dégâts	471
7.3.1	Domaines d'activité et définitions.....	451	7.6	Sollicitation et résistance des pièces	473
7.3.2	Termes de la maintenance.....	452	7.7	Practice your English	475
7.3.3	Objectifs de la maintenance.....	453			
7.3.4	Concepts de maintenance	453			

8 Technique de commande

8.1	Commande et réglage	477	8.5.3	Vannes hydrauliques	531
8.1.1	Bases de la technique de commande.....	477	8.5.4	Systèmes hydrauliques proportionnelles	535
8.1.2	Bases de la technique de régulation.....	479	8.5.5	Conduites hydrauliques et accessoires	537
8.2	Principes des commandes et éléments de base	483	8.5.6	Exemples de circuits hydrauliques	539
8.2.1	Mode de fonctionnement des commandes	483	8.6	Automates Programmables Industriels (API)	542
8.2.2	Eléments des commandes.....	484	8.6.1	Micro-API	542
8.3	Commandes pneumatiques	489	8.6.2	Automates programmables industriels modulaires (API modulaire)	545
8.3.1	Sous-ensembles des installations pneumatiques	489	8.7	Technique de manutention dans l'automatisation	554
8.3.2	Composants pneumatiques.....	490	8.7.1	Technique des systèmes de manutention	554
8.3.3	Schémas pneumatiques.....	499	8.7.2	Classification des systèmes de manutention	555
8.3.4	Projet de schéma de connexion systématique	500	8.7.3	Cinématique et types de construction de robots industriels	555
8.3.5	Exemples de commandes pneumatiques	504	8.7.4	Unités fonctionnelles de robots industriels	557
8.3.6	Technologie du vide	507	8.7.5	Programmation des robots industriels	557
8.4	Commandes électropneumatiques	509	8.7.6	Systèmes de coordonnées	558
8.4.1	Composants des commandes à contact électrique	509	8.7.7	Types de mouvements des robots industriels	559
8.4.2	Capteurs des éléments de signalisation	512	8.7.8	Communication des robots industriels et des périphériques	560
8.4.3	Câblage avec des borniers	517	8.7.9	Sécurité dans l'utilisation de systèmes de manutention	561
8.4.4	Commandes électropneumatiques	518	8.8	Practice your English	562
8.4.5	Îlots de vannes	523			
8.5	Commandes hydrauliques	524			
8.5.1	Alimentation électrique et conditionnement du fluide	525			
8.5.2	Éléments de travail et accumulateur hydraulique	527			

9 Fabrication automatisée

9.1	Commandes CNC	564	9.2.2	Comparaison: Fabrication conventionnelle et fabrication automatisée	600
9.1.1	Caractéristiques des machines à commande ..	564	9.2.3	Automatisation des machines-outils	601
9.1.2	Coordonnées, points d'origine et points de référence	568	9.2.4	Niveaux d'automatisation des installations de fabrication	602
9.1.3	Types de commande, correcteurs d'outils	570	9.2.5	Systèmes de transport dans les systèmes de fabrications automatisés	605
9.1.4	Création des programmes CNC	573	9.2.6	Flux d'information dans les systèmes de fabrication automatisés	605
9.1.5	Cycles et sous-programmes	578	9.2.7	Exemple d'un système de fabrication automatisé pour arbres de transmission	606
9.1.6	Programmation de tours CNC	579	9.2.8	Flexibilité et productivité d'installations de fabrication	607
9.1.7	Programmation de fraiseuses CNC	587	9.3	Practice your English	608
9.1.8	Processus de programmation	593			
9.1.9	Usinage à 5 axes selon PAL	595			
9.2	Installations de fabrication automatisées	599			
9.2.1	Exigences économiques et objectifs	599			

10 Projets techniques

10.1 Principes du travail de projet	609
10.1.1 Organisation du travail en ligne et en projet	609
10.1.2 Le concept du projet	609
10.1.3 Types de projets techniques	610
10.2 Travail du projet sous forme d'action complète et résolution systématique des problèmes	610
10.3 Elaborer les projets en phase à l'exemple de projet du dispositif de levage	611
10.3.1 La phase d'initialisation	611
10.3.2 La phase de définition	612
10.3.3 La phase de planification avec développement du concept	615
10.3.4 La phase de mise en œuvre avec réalisation du projet	620
10.3.5 L'achèvement du projet	622
10.4 Modification des modèles de processus pendant le travail de projet	623
10.5 Documentation des projets techniques	624
10.5.1 Traitement de texte	625
10.5.2 Tableur	627
10.5.3 Logiciel de visualisation	630
10.5.4 Communication technique	633
10.6 Practice your English	636

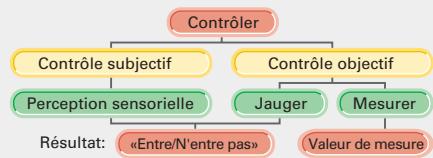
Champ d'apprentissage

Champ d'apprentissage: Fabrication de composants avec des outils à main	638
Champ d'apprentissage: Fabrication de composants avec des machines	640
Champ d'apprentissage: Fabrication de sous-groupes simples	642
Champ d'apprentissage: Entretien des systèmes techniques	644
Champ d'apprentissage: Fabrication de pièces distinctes avec des machines-outils	646
Champ d'apprentissage: Installation et mise en service des systèmes de technique de régulation	648
Champ d'apprentissage: Montage des systèmes techniques	650
Champ d'apprentissage: Programmation et fabrication sur les machines-outils à commande numérique	652
Champ d'apprentissage: Remise en état des systèmes techniques	654
Champ d'apprentissage: Fabrication et mise en service des systèmes techniques partiels	656
Champ d'apprentissage: Suivi de la qualité des produits et processus	658
Champ d'apprentissage: Entretien des systèmes techniques	660
Champ d'apprentissage: Assurance de la capacité de fonctionnement des systèmes automatisés	662

Répertoire 664**Registre des termes techniques** 667

1 Métrologie

1.1	Grandeurs et unités	13
1.2	Bases de la métrologie	15
	Notions de base	15
	Écarts de mesure	18
	Capabilité des moyens de contrôle, surveillance des moyens de contrôle	21



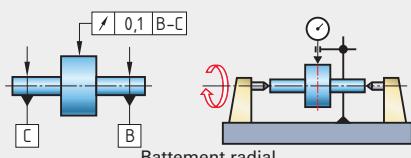
1.3	Moyens de contrôle des longueurs	23
	Règles de mesure, jauge et cales étalon	23
	Instruments de mesure mécaniques et électroniques	26
	Instruments de mesure pneumatiques, électroniques	34
	Instruments de mesure optoélectroniques	37
	Technique multicapteurs	39



1.4	Contrôle des états de surfaces	41
	Profil des surfaces	41
	Paramètres; procédés de contrôle des surfaces	42
1.5	Tolérances et ajustements	45
	Tolérances	45
	Ajustements	49

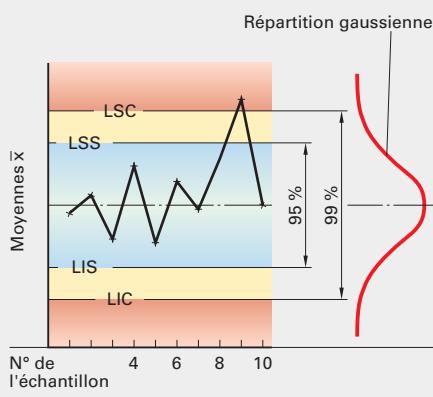


1.6	Contrôle de la forme et de la position	53
	Tolérances de forme et de position	53
	Contrôle des surfaces planes et inclinées	55
	Contrôle de la circularité, de la coaxialité et du battement	58
	Contrôle des filetages; contrôle de la conicité	63
1.7	Practice your English	66



2 Management de la qualité

2.1	Domaines de travail du MQ	67
2.2	La série de normes EN ISO 9000	68
2.3	Exigences de qualité	68
2.4	Caractéristiques de qualité et défauts	69
2.5	Outils du management de la qualité	70
2.6	Maîtrise de la qualité	73
2.7	Assurance de la qualité	74
2.8	Capabilité des procédés	78
2.9	Performance des procédés	81
2.10	Maîtrise statistique des procédés au moyen de cartes de contrôle de la qualité	82
2.11	Audit et certification	85
2.12	Processus d'amélioration continu: les collaborateurs optimisent les procédés	86
2.13	Practice your English	87



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 $299\,792\,458^{\text{e}}$ 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 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 $57,295\,779\,51^{\circ}$.

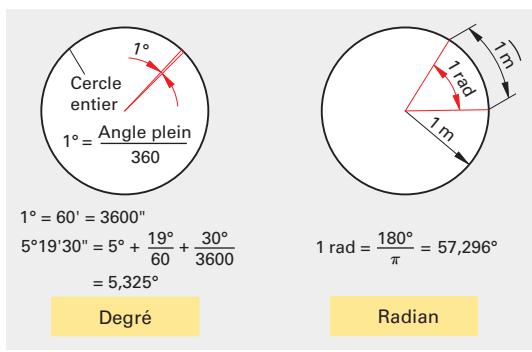


Fig. 2: Unités angulaires

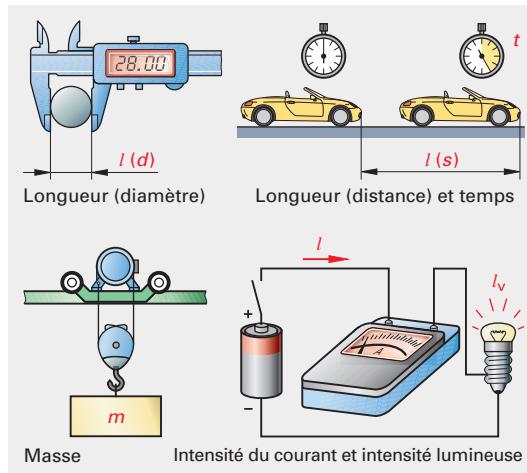


Fig. 1: Grandeurs de base

Tableau 1: Système international d'unités

Grandeurs de base et symboles	Unités de base	
	Nom	Abréviation
Longueur 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 2: Préfixes permettant de désigner les multiples et sous-multiples de dix des unités

Préfixe	Facteur
M méga	multiplié par un million
k kilo	multiplié par mille
h hecto	multiplié par cent
da déca	multiplié par dix
d déci	divisé par dix
c centi	divisé par cent
m milli	divisé par mille
μ micro	divisé par un million

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 **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: $1 \text{ g} = 0,001 \text{ kg}$, $1 \text{ t} = 1000 \text{ kg}$.

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

■ 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 effectuées par seconde ou par minute.

Exemple: Une meule d'un diamètre de 200 mm exécute 6000 tours en 2 min.

Quel est son régime?

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

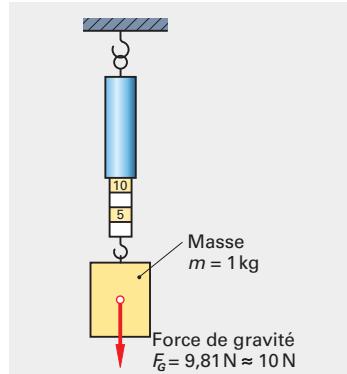


Fig. 1: Masse et force

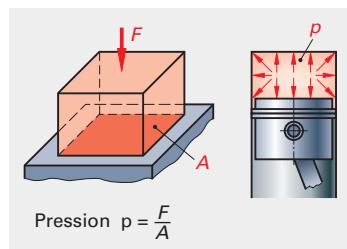


Fig. 2: Pression

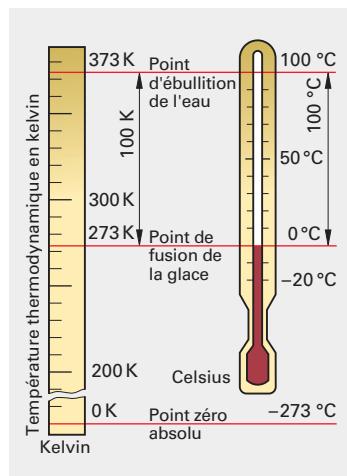


Fig. 3: Échelles de température

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

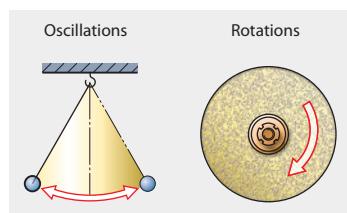


Fig. 4: Processus périodiques

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 jauge (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.

Moyens de contrôle

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

Tous les instruments de mesure et les jauge 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 **jauge** 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 (tableau, p. suivante).

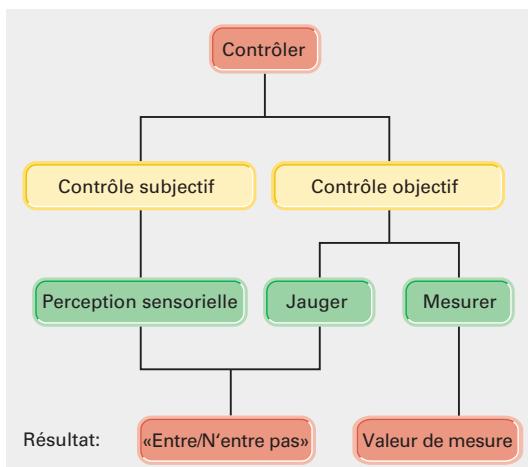


Fig. 1: Types de contrôle et résultat du contrôle

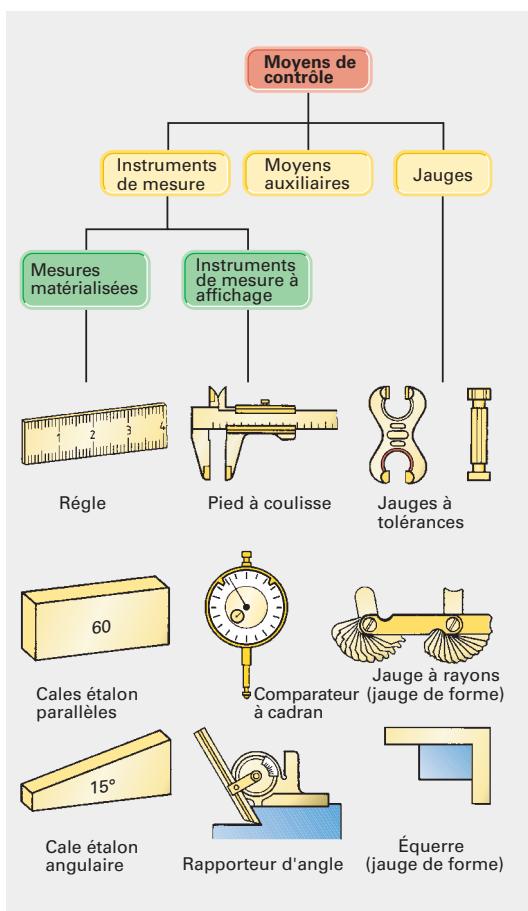
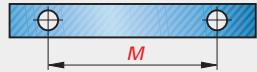


Fig. 2: Moyens de contrôle

Tableau 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 $Skw=0,01 \text{ mm}$
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 Δx	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.	 Affichage numérique $Zw=0,01 \text{ mm}$
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 mesurage 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 (p. 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.	
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.	$u_c = \sqrt{u_{x1}^2 + u_{x2}^2 + \dots + u_{xn}^2}$
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.	$U = 2 \cdot u_c \quad (\text{facteur 2 pour un niveau de confiance de } 95\%)$
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 1: Notions techniques de mesure

Terme	Abré- viation	Définition, explication	Exemple, formules
Fidélité (répétabilité)*	f_w	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.	
Fidélité* (répétabilité) Limite	r	La limite de répétition est la différence pour deux valeurs de mesurages uniques alors que la probabilité est de 95%.	
Hystérésis de mesure*	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.	
Champ d'erreur d'indication*	f_e	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.	
Champ d'er- reur d'indica- tion total	f_{ges}	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.	
Erreurs maximales tolérées*	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. $G_o = G_u = 20 \mu\text{m}$	
Étendue de mesure*	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.	
Champ de mesure	Mes	Le champ de mesure est la différence entre la valeur finale et la valeur initiale de l'étendue de la mesure.	
Étendue d'indication	Az	L'étendue d'indication est comprise entre la plus grande et la plus petite valeur d'un instrument de mesure.	

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

1.2.2 Écarts de mesure

Causes des écarts de mesure

(tableau 1, p. suivante)

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 jauge 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 jauge 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.

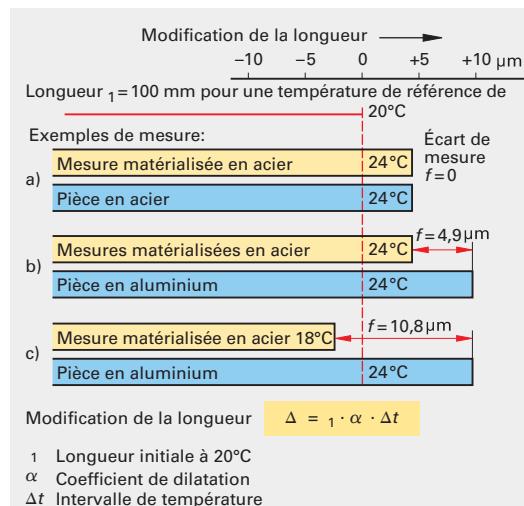


Fig. 1: Écarts de mesure résultant de la température

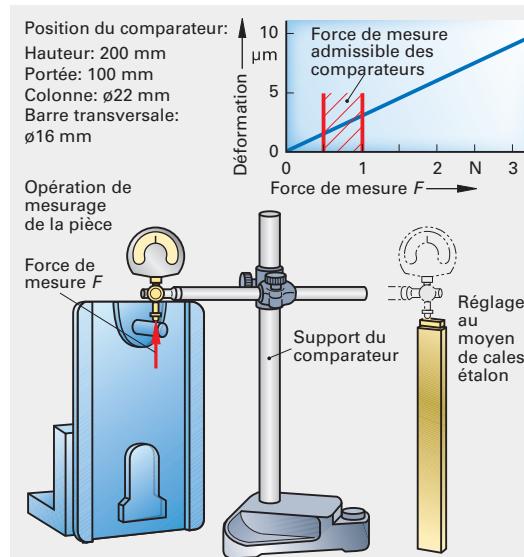


Fig. 2: Écarts de mesure consécutifs à une déformation élastique sur le support du comparateur, résultant de la force de mesure

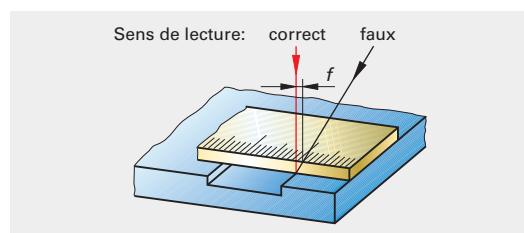
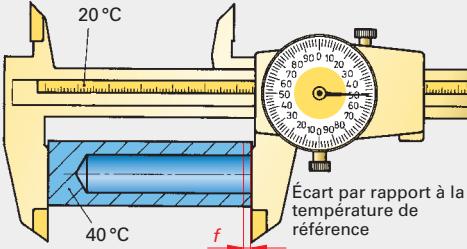
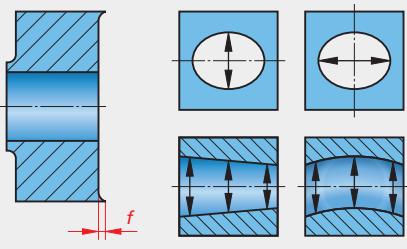
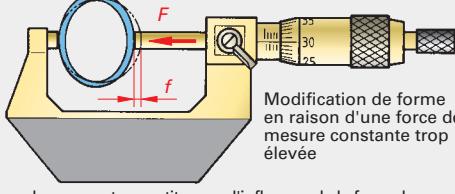
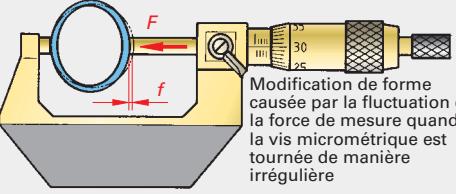
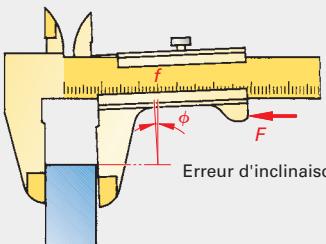
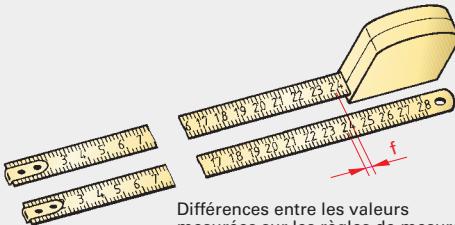
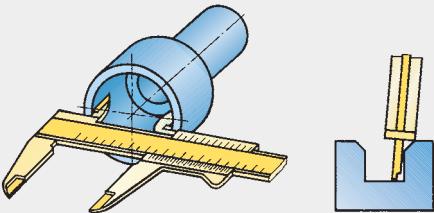
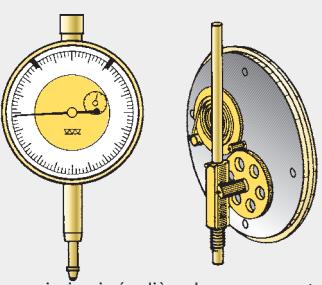
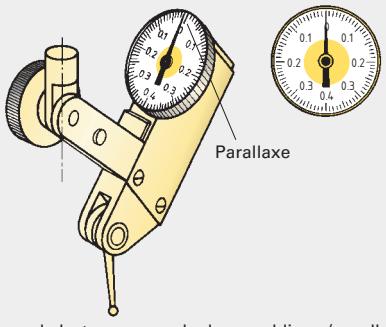


Fig. 3: Écart de mesure dû à la parallaxe

Tableau 1: Causes et types d'écart de mesure

Écarts de mesure systématiques	Écarts de mesure aléatoires
 <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 formes</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 mesures intérieures</p> <p>Écarts de mesure causés par l'usure des surfaces de mesure</p>	 <p>Erreurs d'inclinaison</p> <p>«Erreur d'inclinaison» dépendant de la force de mesure et du jeu dans le coulisseau</p>
 <p>Pas du filetage</p> <p>Influence des fluctuations de pas sur les valeurs de mesure</p>	 <p>Positionnement incertain du pied à coulisse lors de mesures intérieures</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>	 <p>Parallaxe</p> <p>Erreur de lecture par angle de vue oblique (parallaxe)</p>

Les écarts 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'**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.

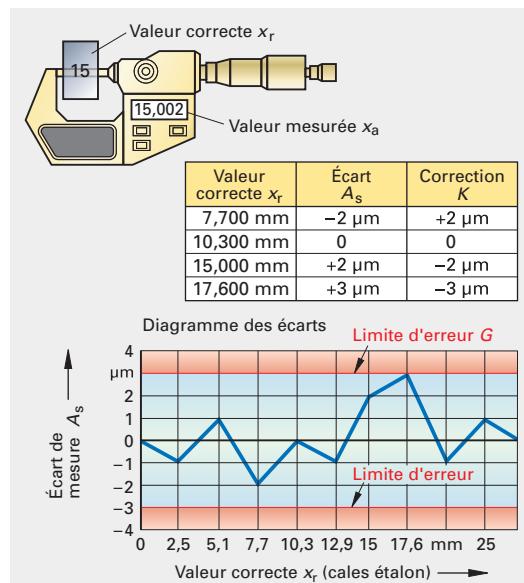


Fig. 1: Écarts systématiques d'un micromètre d'extérieur

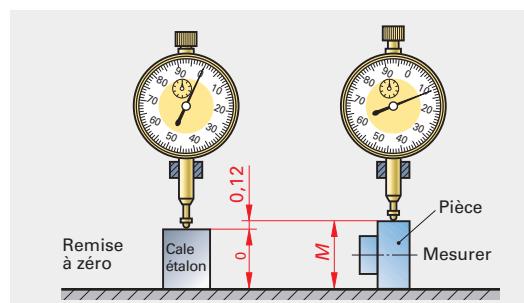


Fig. 2: Mise à zéro de l'affichage et mesure par comparaison

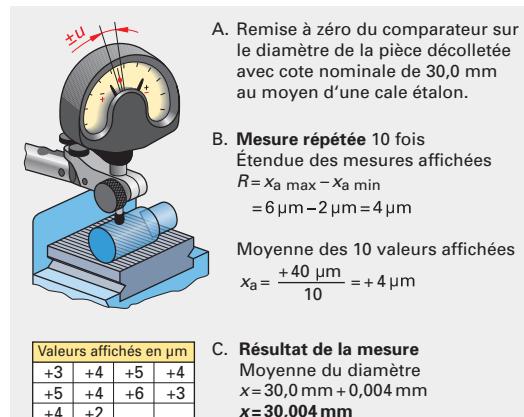


Fig. 3: Écarts aléatoires d'un comparateur pour les mesures effectuées dans des conditions de répétabilité