Techniques de la mécanique

3ème édition française

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

Nº de la maison d'édition : 11664

Titre original: Fachkunde Metall (58ème édition 2017, 4ème 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

3ème 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 58ème 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 .

Printemps 2017 Les auteurs

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

1 Métrologie

1.1 Grandeurs et unités . . . 13
1.2 Bases de la métrologie . . . 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
1.3 Moyens de contrôle des longueurs . . . 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
1.4 Contrôle des états de surfaces . . . 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
1.5 Tolérances et ajustements . . . 47
1.5.1 Tolérances . . . 47
1.5.2 Ajustements . . . 51
1.6 Spécifications géométriques du produit (GPS) . . . 55
1.7 Contrôle de la forme et de la position . . . 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
1.8 Practise your English . . . 71

2 Management de la qualité

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

3 Technique de fabrication

3.1 Sécurité au travail . . . 94
3.2 Différents procédés de fabrication . . . 96
3.3 Moulage . . . 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
3.4 Mise en forme des matières plastiques . . . 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
3.5 Formage . . . 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
3.6 Coupe . . . 122
3.6.1 Cisaillage . . . 122
3.6.2 Découpage sans contact . . . 127
3.7 Fabrication par enlèvement de copeaux, guidée à la main . . . 131
3.7.1 Bases . . . 131
3.7.2 Fabrication avec des outils à main . . . 132
3.8 Fabrication avec des machines-outils . . . 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
3.9 Liaison . . . 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
3.10 Procédés de fabrication additifs . . . 261
3.10.1 Prototypage rapide . . . 262
3.10.2 Outillage rapide . . . 264
3.11 Enduction . . . 266
3.12 Atelier de fabrication et protection de l'environnement . . . 270
3.13 Practise your English . . . 273

4 Automatisation de la fabrication

4.1 Commandes CNC pour machines-outils 275
4.1.1 Caractéristiques des machines à commande CNC. 275
4.1.2 Coordonnées, points d'origine et points de références 279
4.1.3 Types de commande, correcteurs d'outils 281
4.1.4 Création des programmes CNC selon ISO 284
4.1.5 Cycles et sous-programmes 289
4.1.6 Programmation de tours CNC 290
4.1.7 Programmation defraiseuses CNC 298
4.1.8 Processus de programmation 304
4.1.9 Usinage à 5 axes selon PAL 306
4.2 Technique de manutention dans l'automatisation 310
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
4.3 Machines-outils CNC automatisées 318
4.3.1 Automatisation d'un centre d'usinage CNC 318
4.3.2 Automatisation d'un tour CNC 320
4.4 Systèmes de transport dans des installations de fabrication automatisées . 322
4.5 Dispositifs de surveillance dans les machines-outils 323
4.6 Niveaux d'automatisation des installations de fabrication 324
4.7 Exemple d'un système de fabrication automatisé pour arbres de transmission 325
4.8 Industrie 4.0 326
4.9 Exigences technico-commerciales et objectifs de la fabrication 328
4.10 Flexibilité et productivité d'installations de fabrication 328
4.11 Practise your English 330

5 Technique des matériaux

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

6 Génie mécanique

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

7 Electrotechnique

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

8 Montage, mise en service, entretien

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

9 Technique de commande

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

10 Projets techniques

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

Champ d'apprentissage

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

Répertoire des entreprises et crédit photos 680

Index avec traduction en anglais 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)
Fabrication de composants avec des outils à main	**Projet : Porte-clés** 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. 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 Différents procédés de fabrication 3.5.1 Comportement des matériaux lors du formage 3.5.2 Procédés de formage 3.5.3 Déformation plastique par flexion 3.6 Coupe 3.6.1 Cisaillage 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
Fabrication de composants avec des machines	**Projet : Dispositif de serrage pour pièces rondes** 656
Evaluation des dessins et des listes de pièces. Choix des matériaux selon les propriétés spécifiques. Planification du déroulement de la fabrication avec des calculs.	6.6 Unités d'entraînement 6.5 Unités fonctionnelles pour la transmission d'énergie 1.4 Contrôle des états de surface 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. Utilisation des outils.	6.1 Classification des machines 6.2 Unités fonctionnelles des machines et appareils 3.8.1 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)
	1.2.2 Erreurs 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
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
Fabrication de sous-groupes simples	**Projet : Support de perçage pour perceuse à main** . . . 658
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.	6.1 Classification des machines 6.4 Unités fonctionnelles pour l'appui et le soutien 6.6 Unités d'entraînement 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
Distinction du procédé d'assemblage. Choix des outils et des pièces normalisées.	3.9 Liaison 5.4 Aciers et matériaux en fonte de fer
Documentation et présentation des résultats de travail.	2 Management de la qualité 2.1 Domaines de travail du MQ 2.2 La série de normes EN ISO 9000 2.3 Exigences de qualité 2.4 Caractéristiques de qualité et défauts 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.	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
Entretien des systèmes techniques	**Projet : Entretien d'une perceuse à colonne** 660
Évaluation des mesures de maintenance	1 Métrologie 1.1 Grandeurs et unités 8.3 Entretien 8.4 Corrosion et protection contre la corrosion 8.5 Analyse de la sécurité et évitement des dommages 8.6 Sollicitation et solidité des éléments de construction
Planification des travaux d'entretien, détermination des outils et des matières auxiliaires.	5.1.3 Matières auxiliaires et énergie 6.6 Unités d'entraînement 6.5 Unités fonctionnelles pour la transmission d'énergie 6.4.1 Lubrifiants 8.3.6 Inspection
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

Champ d'apprentissage	Informations factuelles dans le livre (exemples)
Fabrication de pièces distinctes avec des machines-outils	**Projet : Elément de serrage hydraulique** 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
Développement des plans de contrôle avec les moyens de management de la qualité.	2.7.1 Planification des contrôles 5.8 Traitement thermique des aciers
Installation et mise en service des systèmes de technique de régulation	**Projet : Séparation des différentes billes en métal** 664
Installation et mise en service des systèmes de technique de régulation.	6.1 Classification des machines
Détermination des composants et des séquences fonctionnelles dans différentes techniques d'appareils à partir de commandes.	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
Conception et mise en service des différentes commandes.	9.3 Commandes pneumatiques 9.4 Commandes électropneumatiques 9.5 Commandes hydrauliques
Montage des systèmes techniques	**Projet : Engrenages coniques** 666
Montage des systèmes techniques partiels et création des plans de montage.	1.5 Tolérances et ajustements 1.7 Contrôle de la forme et de la position
Montage des sous-groupes.	3.9 Liaison
Réalisation d'un contrôle fonctionnel et création d'un procès-verbal d'essai.	6.4 Unités fonctionnelles pour l'appui et le soutien
Grandeurs caractéristiques de résistance.	5.11 Essais des matériaux
Documentation et présentation des résultats de travail.	10.5 Documentation des documents techniques
Programmation et fabrication sur les machines-outils à commande numérique	**Projet : Arbre de transmission et les chapeaux de palier** 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

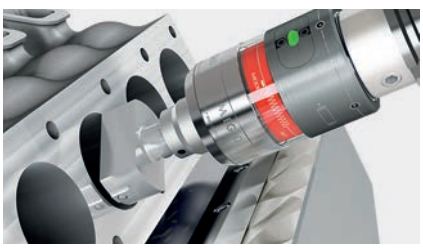
Champ d'apprentissage	Informations factuelles dans le livre (exemples)
Remise en état des systèmes techniques	**Projet : Broche à moteur d'une fraiseuse CNC** 670
Planification des mesures de remise en état.	8.5 Analyse de la sécurité et évitement des dommages 8.6 Sollicitation et solidité des éléments 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.	
Fabrication et mise en service des systèmes techniques partiels	**Projet : Entraînement d'avance d'une fraiseuse CNC** 672
Description des relations fonctionnelles des composants et des sous-groupes. Choix des procédés de fabrication et des accessoires de montage appropriés.	3.8.11 Brochage 3.8.12 Superfinition 3.9 Liaison
Assemblage et mise en service des systèmes partiels aux systèmes globaux.	8.2 Mise en service
Contrôle de la cession.	10.5 Documentation des documents techniques
Suivi de la qualité des produits et processus	**Projet : Niveau bulles d'air** 674
Réalisation des études de capabilité des machines et des processus. Enregistrement des données de processus et évaluation des grandeurs caractéristiques.	2.5 Outils du management de la qualité 2.6 Maîtrise de la qualité 2.7 Assurance de la qualité
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.	2.8 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
Entretien des systèmes techniques	**Projet : Installation de remplissage** 676
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
Remise des systèmes techniques.	10.3.5 L'achèvement du projet
Assurance de la capacité de fonctionnement des systèmes automatisés	**Projet : Automatisation d'un poste de travail manuel** 678
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 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

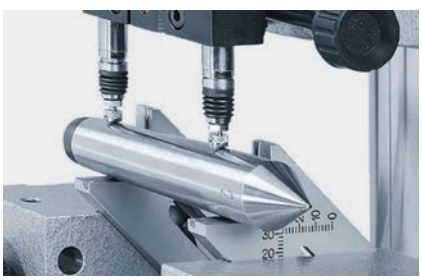
1 Métrologie

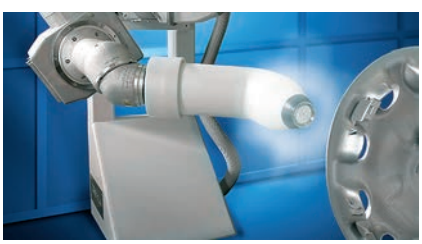
1.1 Grandeurs et unités 13
1.2 Bases de la métrologie 15
Notions de base 15
Erreurs de mesure 18
Capabilité des moyens de contrôle, surveillance des moyens de contrôle 21
1.3 Moyens de contrôle des longueurs 23
Cales étalons et formes étalons 23
Instruments de mesure mécaniques et électroniques 26
Instruments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

2 Management de la qualité

2.1 Domaines de travail du MQ 72
2.2 La série de normes EN ISO 9000 73
2.3 Exigences de qualité. 73
2.4 Caractéristiques de qualité et défauts 74
2.5 Outils du management de la qualité. 75
2.6 Maîtrise de la qualité 78
2.7 Assurance de la qualité 79
2.8 Capabilité des procédés 83
2.9 Performance des procédés. 86
2.10 Maîtrise statistique des procédés au moyen de cartes de contrôle de la qualité . 87
2.11 Audit et certification. 90
2.12 Processus d'amélioration continu: les collaborateurs optimisent les procédés . . . 91
2.13 Practise your English 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 458e 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°.

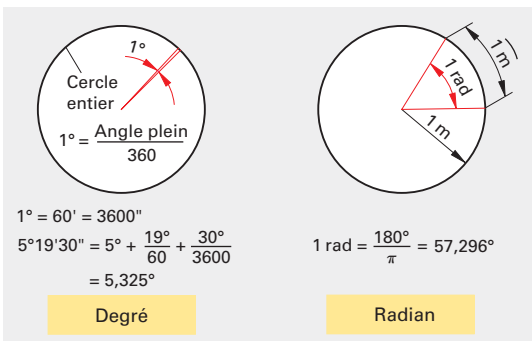


Fig. 2 : Unités angulaires

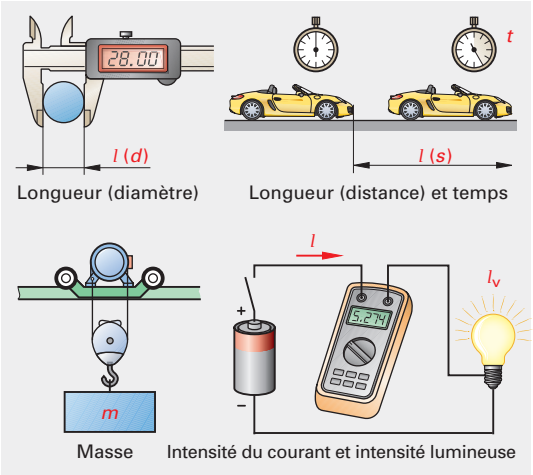


Fig. 1 : Grandeurs de base

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	10^6	= 1 000 000
k	kilo	multiplié par mille	10^3	= 1000
h	hecto	multiplié par cent	10^2	= 100
da	déca	multiplié par dix	10^1	= 10
d	déci	divisé par dix	10^{-1}	= 0,1
c	centi	divisé par cent	10^{-2}	= 0,01
m	milli	divisé par mille	10^{-3}	= 0,001
µ	micro	divisé par un million	10^{-6}	= 0,000 001

Tableau 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 g = 0,001 kg, 1 t = 1000 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 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 Pa = 1 N/m² = 0,00001 bar; 1 bar = 10^5 Pa = 10 N/cm²

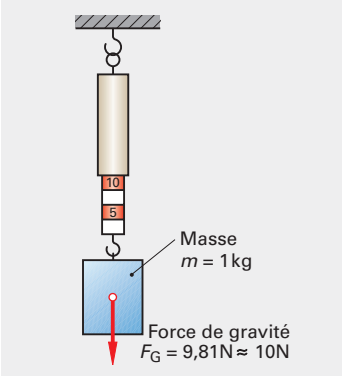


Fig. 1: Masse et force

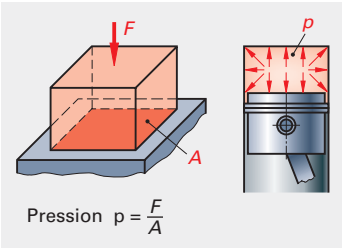


Fig. 2: Pression

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 °C = 273,15 K; 0 K = –273,15 °C

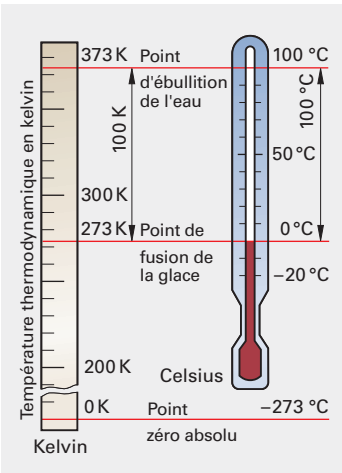


Fig. 3: Échelles de température

Temps, fréquence et fréquence de rotation

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

Unités: 1 s = 1000 ms; 1 h = 60 min = 3600 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/s ou en hertz (Hz).

Unités: 1/s = 1 Hz; 10^3 Hz = 1 kHz; 10^6 Hz = 1 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. Quelle est sa fréquence de rotation?

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

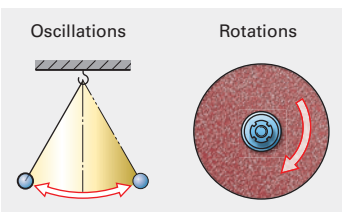


Fig. 4: Processus périodiques

Formules

Les formules établissent des rapports entre les grandeurs.

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

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

Dans le 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 N ou A = 1 cm². Les équations d'unités indiquent le rapport entre les unités, par. ex. 1 bar = 10^5 Pa.

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).**

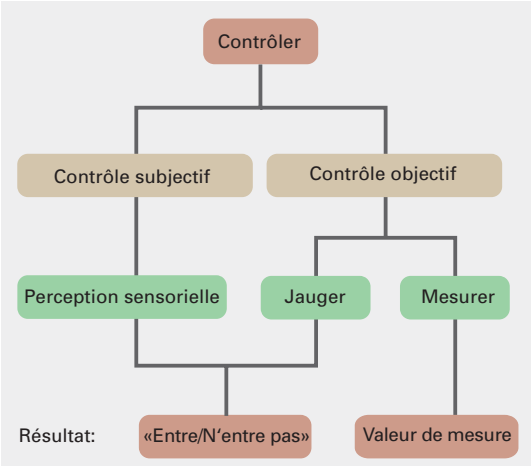


Fig. 1: Types de contrôle et résultat du contrôle

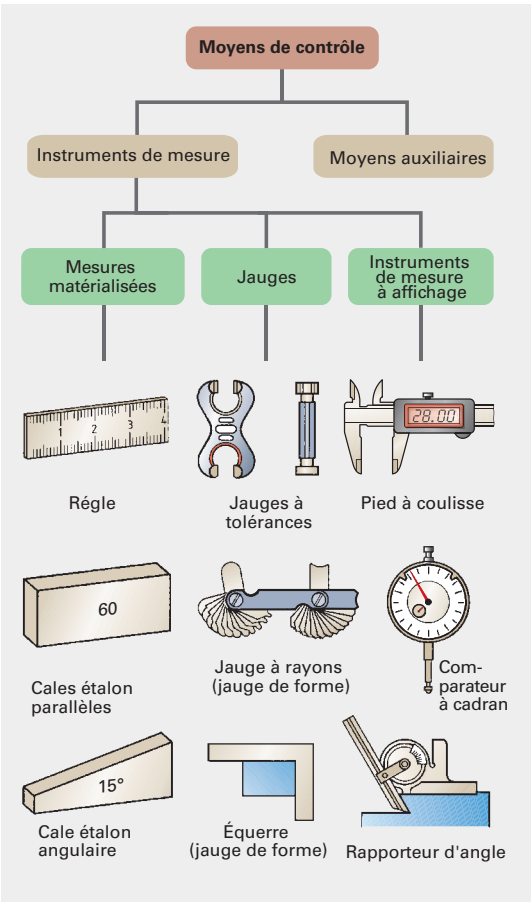


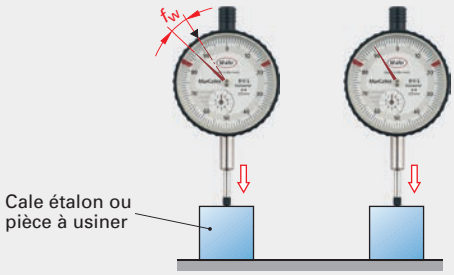
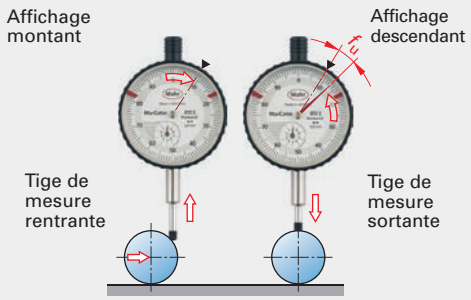
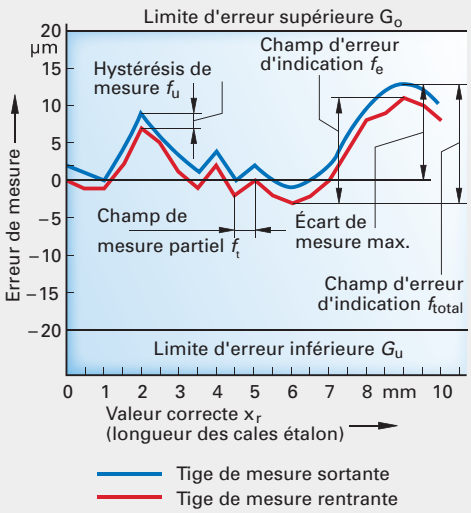
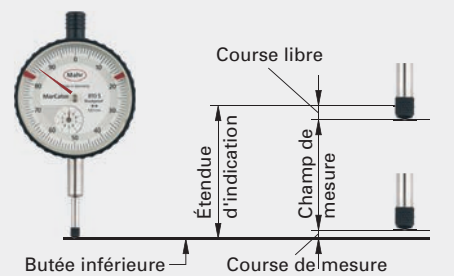
Fig. 2: Équipements de mesure

Tableau 1 : Notions techniques de mesure

Terme	Abréviation	Définition, explication	Exemple, formules
Le mesurande	***M***	Grandeur physique soumise à une mesure, par ex. un diamètre ou la distance entre les axes 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 $D_{af} = 0{,}01$mm
Indication de l'échelle	–	Affichage continu sur une échelle avec repères	
Indication numérique	–	Affichage numérique sur une échelle à chiffres	
Résolution d'affichage*	D_{af} ou ⊸⊷	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.	Affichage numérique $D_{num} = 0{,}01$mm
Résolution d'affichage numérique	D_{num}	Correspond au pas d'une échelle numérique.	
Valeur mesurée	x_a $x_1, x_2 \ldots$	La valeur mesurée est affichée par un instrument, elle est composée de la valeur vraie et des écarts de mesure aléatoires et systématiques. La moyenne $\bar{x}$ résulte en général de cinq mesures répétitives. 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 répétitivs 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	$\bar{x}$		
Valeur vraie	x_w		
Valeur correcte	x_r		
Résultat de mesure non corrigé	x_a $x_1, x_2 \ldots$ $\bar{x}$	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.	
Erreur 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).	$A_s = x_a - x_r$ $(A_s = \bar{x}_a - x_r)$
Valeur de correction	K	Compensation d'écarts systématiques connus, par ex. écart de température	$K = -A_s$ $(K = K_1 + K_2 \ldots + K_n)$
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.	$u_c = \sqrt{u^2_{x1} + u^2_{x2} + \ldots u^2_{xn}}$
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.	$U = 2 \cdot u_c$ (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)	$y = x + K$ $(y = \bar{x} + K)$
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.	$Y = y \pm U$ $(Y = \bar{x} + K \pm U)$

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

Tableau 1 : Notions techniques de mesure

Terme	Abréviation	Définition, explication	Exemple, formules
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'erreur d'indication 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. $G_o = G_u = 20$ µm	
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 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.

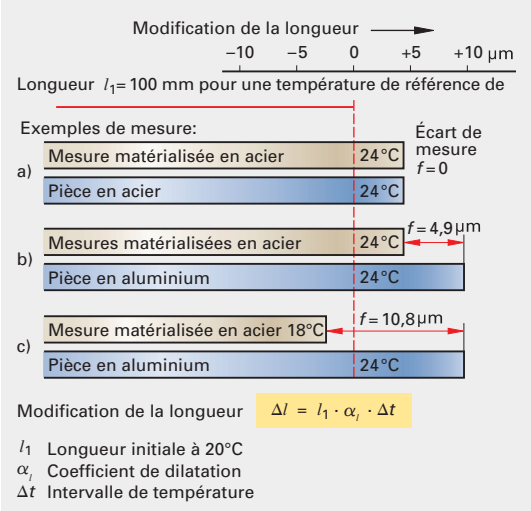


Fig. 1: Écarts de mesure résultant de la température

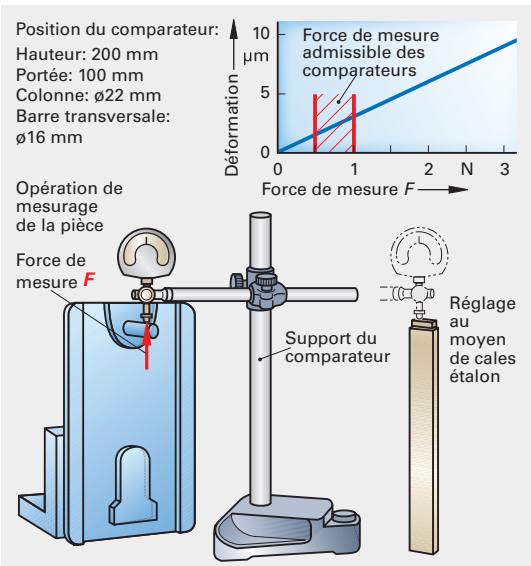


Fig. 2: Erreurs de mesure consécutifs à une déformation élastique sur le support du comparateur, résultant de la force de mesure

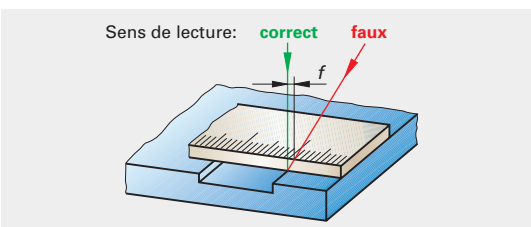
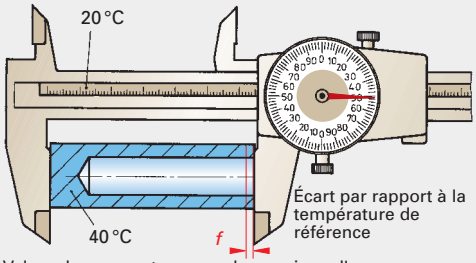
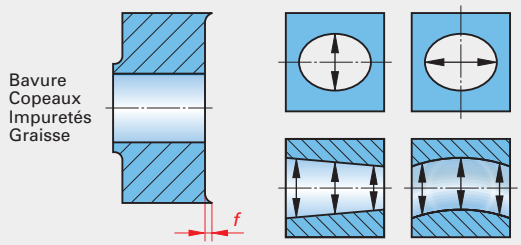
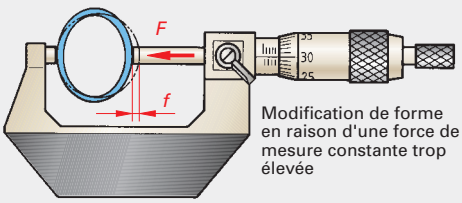
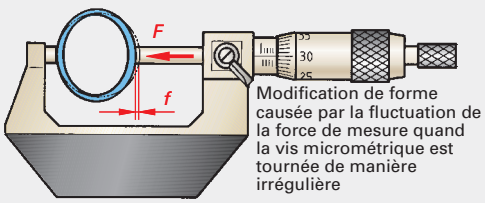
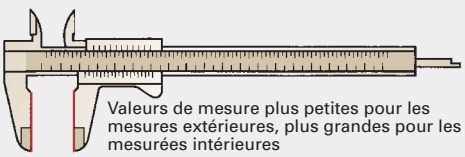
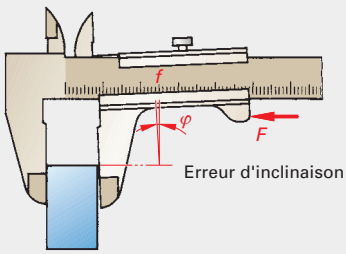
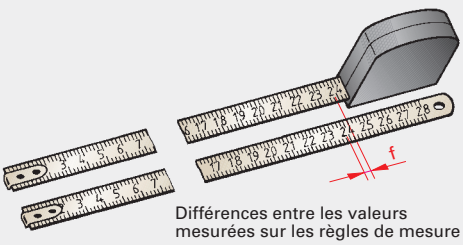
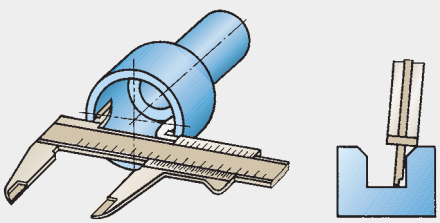
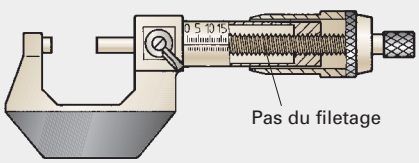
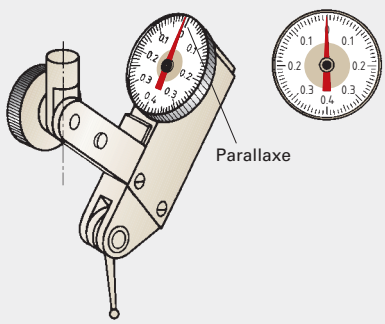
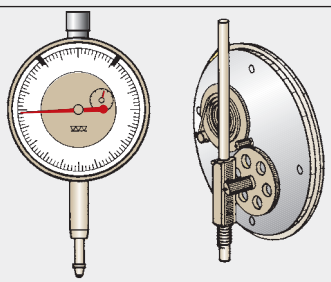


Fig. 3: Erreurs de parallaxe

Tableau 1 : Causes et types d'erreurs de mesure

Erreurs de mesure systématiques	Erreurs de mesure aléatoires
 Valeur de mesure trop grande en raison d'une température trop élevée de la pièce	 Incertitudes causées par des surfaces souillées et des variations des forme
 Valeur de mesure trop petite sous l'influence de la force de mesure	 Dispersion des valeurs de mesure causée par la fluctuation de la force de mesure
 Erreurs de mesure causés par l'usure des surfaces de mesure	 «Erreur d'inclinaison» dépendant de la force de mesure et du jeu dans le coulisseau
	 Positionnement incertain du pied à coulisse lors de mesures intérieures
 Influence des fluctuations de pas sur les valeurs de mesure	 Erreur de lecture par angle de vue oblique (parallaxe)
 Transmission irrégulière du mouvement de la tige de mesure	

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

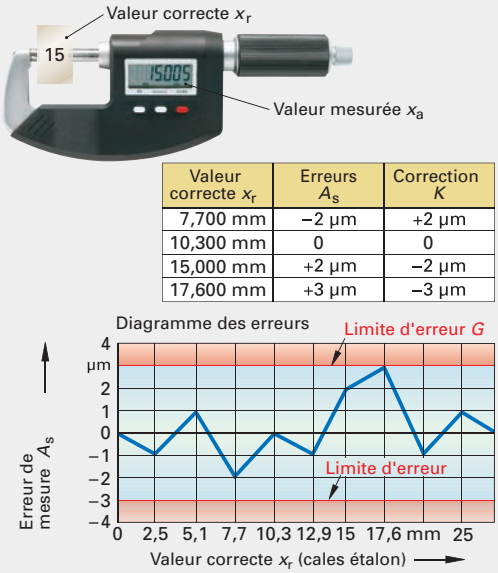
L'affichage est comparé avec une cale étalon sur l'exemple du contrôle d'un micromètre **(fig. 1)**. La valeur nominale des cales étalon (inscription) peut être considérée comme la valeur correcte. **L'erreur** systématique A_s d'une valeur de mesure individuelle résulte de la différence de la valeur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



Valeur correcte x_r	Erreurs A_s	Correction K
7,700 mm	−2 µm	+2 µm
10,300 mm	0	0
15,000 mm	+2 µm	−2 µm
17,600 mm	+3 µm	−3 µm

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

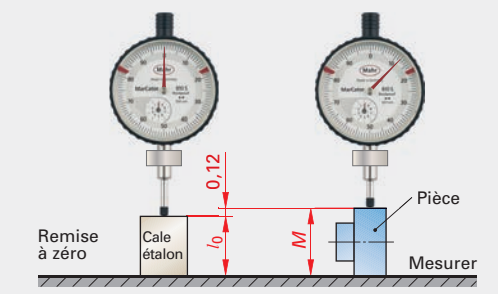
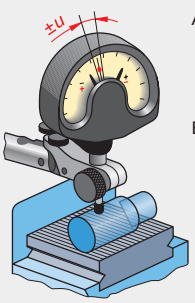


Fig. 2: Mise à zéro de l'affichage et mesure par comparaison



A. Remise à zéro du comparateur sur le diamètre de la pièce décolletée avec cote nominale de 30,0 mm au moyen d'une cale étalon.

B. **Mesure répétée** 10 fois
Étendue des mesures affichées
$R = x_{a\,max} - x_{a\,min}$
$= 6\,\mu m - 2\,\mu m = 4\,\mu m$

Moyenne des 10 valeurs affichées
$x_a = \frac{+40\ \mu m}{10} = +4\,\mu m$

Valeurs affichés en µm			
+3	+4	+5	+4
+5	+4	+6	+3
+4	+2		

C. **Résultat de la mesure**
Moyenne du diamètre
$x = 30{,}0\,mm + 0{,}004\,mm$
$\boldsymbol{x = 30{,}004\,mm}$

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

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.