

Cours

Métrologie

Youcef Mouadji
Salim Selami

PREFACE

La genèse d'une innovation technologique est constituée par l'ensemble des faits scientifiques et techniques qui ont concouru à sa formation. La connaissance approfondie de cette phase préalable, difficile à observer quand elle est en cours, mais pourrait se reconstituer, à posteriori, est essentielle pour tenter de prévoir et de diriger le flux des changements techniques tout le long des différentes étapes des développements scientifiques.

Ce module permet à l'étudiant : de savoir identifier et affermir la place de la fonction "Métrologie" au sein d'un laboratoire de contrôle, en relation avec le système d'assurance qualité en vigueur ou en projet dans cette structure, d'apprendre à avoir confiance et inspirer confiance dans des résultats de mesure ou d'essais, de maîtriser les outils associés, d'acquérir les fondements de base sur le contrôle. L'étudiant doit avoir des connaissances de l'ensemble des techniques et des opérations nécessaires, ainsi que des notions de base en fabrication technologique, où sont mis en évidence, les notions fondamentales des tolérances et ajustements ainsi que les états de surfaces, car étant des connaissances de base, impératives pour la fabrication en technologie.

Sommaire

I. INTRODUCTION.....	6
I.1. POURQUOI LA METROLOGIE DIMENSIONNELLE EN GENIE MECANIQUE ?	6
I.2. UTILITE DE LA METROLOGIE	6
I.3. LES DIFFERENTES CLASSES DE METROLOGIE	7
II. APERÇU SUR LA NORMALISATION	8
II.1. INTRODUCTION.....	8
II.2. HISTORIQUE DE LA NORMALISATION	8
II.2.1. HISTORIQUE DE LA METROLOGIE ALGERIENNE.....	8
II.3. SYSTEME INTERNATIONAL D'UNITES (SI)	8
II.4. LES UNITES DU SYSTEME INTERNATIONAL	9
II.4.1. UNITES DE BASE	9
II.4.2. UNITE DERIVEE	10
II.5. SYSTEME DE CONTROLE DE CONFORMITE	10
II.5.1. LE CONTROLE DE CONFORMITE COMPREND :	10
II.5.2. METROLOGIE LEGALE	10
II.6. DIFFERENTS CATEGORIES DE LA METROLOGIE.....	11
II.6.1. LA METROLOGIE FONDAMENTALE OU SCIENTIFIQUE	11
II.6.2. LA METROLOGIE INDUSTRIEL	12
II.7. VERIFICATION ET ETALONNAGE	14
II.7.1. CHAINE D'ETALONNAGE.....	14
II.7.2. ENVIRONNEMENT.....	15
II.8. PROCEDES DE MESURE	15
II.9. GESTION DES MOYENS DE MESURE.....	15
II.10. TERMINOLOGIE ET DEFINITIONS	16
III. CLASSIFICATION DES INSTRUMENTS DE MESURE	22
III.1. INTRODUCTION.....	22
III.2. INSTRUMENTS DE MESURE A DIMENSIONS VARIABLES.....	22
III.2.1. INSTRUMENTS DE MESURE DIRECTE	22
III.2.2. INSTRUMENTS DE MESURE INDIRECTE	31
COMPARATEUR A CADRAN METRIQUE PALPEUR INTERIEUR JAUGES	
D'EPAISSEUR	32
III.3. INSTRUMENTS DE MESURE A DIMENSIONS FIXES	33
III.3.1. POUR ALESAGES	33
III.3.2. POUR ARBRES.....	33
III.3.3. POUR FILETAGES.....	34
III.3.4. POUR ANGLES.....	34
III.3.5. INSTRUMENTS DE MESURE PAR JAUGEAGE.....	35
III.3.6. LES REGLES.....	36
III.4. OPERATIONS ET VERIFICATIONS PREALABLES A LA MESURE	36
III.4.1. VERIFIER L'ETAT DE L'INSTRUMENT	36
III.4.2. VERIFICATION DES ERREURS SYSTEMATIQUES	36

III.4.3. PROCEDURE DE CONTROLE.....	37
III.5. TRAITEMENT STATISTIQUE DES MESURES.....	37
III.5.1. CONSTRUCTION D'UN HISTOGRAMME.....	38
IV. TOLERANCES DIMENSIONNELLES ET AJUSTEMENTS.....	40
IV.1. CONTROLE DIMENSIONNEL ET L'INTERCHANGEABILITE.....	40
IV.1.1. LE CONTROLE DIMENSIONNEL.....	40
IV.1.2. L'INTERCHANGEABILITE.....	40
IV.2. TOLERANCES ET AJUSTEMENTS.....	41
IV.2.1. NOTIONS DE DIMENSIONS ET COTES TOLERANCEES.....	41
IV.2.2. TYPES DE COTES.....	42
IV.3. ECARTS D'UN ARBRE (ALESAGE).....	42
IV.3.1. ECART EFFECTIF.....	42
IV.3.2. ECART SUPERIEUR.....	42
IV.3.3. ECART INFERIEUR.....	42
IV.4. INTERVALLE DE TOLERANCE.....	43
COTES TOLERANCEES.....	43
IV.5. AJUSTEMENTS.....	43
IV.5. 1. TYPES D'AJUSTEMENTS :.....	44
AJUSTEMENT AVEC JEU GARANTI.....	44
AJUSTEMENT AVEC SERRAGE GARANTI.....	44
AJUSTEMENT INCERTAIN.....	44
IV.5.2. QUALITE D'AJUSTEMENT.....	45
IV.5.3. CHOIX D'UN AJUSTEMENT.....	45
IV.5.4. INDICES DE QUALITE :.....	49
IV.6. POSITION DES TOLERANCES.....	51
IV.6.1. SYSTEME DE L'ARBRE NORMAL.....	52
IV.6.2. SYSTEME DE L'ALESAGE NORMAL.....	52
IV.7. INSCRIPTION DES TOLERANCES.....	52

I. INTRODUCTION

Le terme Métrologie vient du grec Métron qui veut dire mesure et Logos qui veut dire Science, la métrologie est donc la science de la mesure sur ses plans théorique et pratique. La métrologie (mécanique) est le domaine des connaissances qui englobe l'ensemble des aspects théoriques, techniques, technologiques, de même que les aspects de savoir-faire pratique, concernant les opérations ayant pour but de déterminer les valeurs de diverses grandeurs associées à des caractères dimensionnels et à des caractères géométriques appartenant à d'objets physiques et l'évaluation d'une grandeur ainsi que la détermination de l'incertitude liée à cette mesure. La métrologie permet de déterminer la conformité des produits mais elle participe aussi l'amélioration de la qualité. En effet, on ne peut valider une action sur un procédé qu'en vérifiant le résultat de cette action par une mesure.

I.1. POURQUOI LA METROLOGIE DIMENSIONNELLE EN GENIE MECANIQUE ?

La métrologie étant la discipline qui consiste à mesurer des grandeurs physiques (toutes les grandeurs physiques sont mesurables). On rappelle que mesurer une grandeur c'est comparer cette grandeur avec une autre arbitrairement choisie comme étalon.

La métrologie dimensionnelle est donc la discipline qui traite du domaine de la mesure des longueurs.

Tout produit mécanique quel qu'il soit est constitué par l'assemblage d'un certain nombre d'objets élémentaires (vis, bille, carter, pignon...) que l'on appelle couramment pièces. Chacune de ces pièces est conçue de façon à remplir un certain nombre de fonctions et ceci dans des domaines extrêmement variés.

- La mécanique : transmission d'efforts, résistance aux contraintes...
- La physique : conductivité thermique ou électrique, masse, couleur...
- La chimie : comportement vis-à-vis de l'environnement...
- La production : contraintes de fabrication...
- L'économie : coût, disponibilité des matières premières...
- L'esthétique : aspect...
- L'usage : facilité d'utilisation...

Afin d'obtenir un objet capable de remplir au mieux ces différentes fonctions, le concepteur va pouvoir agir dans deux domaines principaux :

- Les matériaux : en quoi sera réalisé l'objet (métal, polymère, céramique, matériau composite...)?
- La géométrie : quelles seront les formes et les dimensions à donner à cet objet ?

Naturellement, les deux paramètres ne sont pas forcément dépendants. Par exemple si l'on doit concevoir un câble devant supporter une certaine charge, la section de ce câble dépendra directement du matériau choisi pour sa réalisation (chanvre, acier, nylon). Par contre sa longueur dépendra uniquement du déplacement que l'on doit faire subir à la charge.

I.2. UTILITE DE LA METROLOGIE

- Maîtriser les processus de fabrication
- Vérifier et évaluer la conformité des produits aux spécifications techniques et réglementaires
- Contrôler la qualité des produits
- Vérifier l'exactitude des résultats analytiques
- Assurer la loyauté des échanges commerciaux et la protection des intérêts du consommateur
- Assurer la protection de la santé et de la sécurité des citoyens
- Assurer la préservation et la protection de l'environnement

I.3. LES DIFFERENTES CLASSES DE METROLOGIE

Vu l'importance de la mesure dans la vie des être humains, la métrologie a connu une évolution importante surtout avec le développement de la technologie et des échanges commerciaux entre les différents pays. En plus de cette évolution, la métrologie a connu également une subdivision dans ses tâches, ainsi, on trouve les branches suivantes:

Métrologie scientifique

Cette branche s'intéresse au développement et perfectionnement des moyens et méthodes de mesure afin qu'ils répondent aux exigences du développement dans les différents domaines industriels et scientifiques.

Cette branche est généralement développée au niveau des laboratoires spécialisés ainsi que certains bureaux d'étude de certaines entreprises de technologie avancée.

Métrologie appliquée

Les différents moyens et méthodes nouvellement développés sont directement incorporés dans les entreprises de fabrication qui les utilisent en vue d'améliorer la qualité de leurs produits.

Métrologie légale

Cette branche s'intéresse à la mise en place des lois, nationales et internationales permettant de garantir le public en ce qui concerne la qualité et la sécurité des produits et de favoriser les échanges commerciaux nationaux et internationaux.

II. APERÇU SUR LA NORMALISATION

II.1. INTRODUCTION

Les produits manufacturés sont conçus sur des plans. Ces plans comportent une représentation graphique de chaque pièce à réaliser ainsi que des annotations complémentaires dont fait partie la cotation. La métrologie n'a de sens que si le concepteur et le métrologue interprètent cette cotation de la même manière. Les normes servent à fixer les définitions et les méthodes de travail. Dans le domaine de la métrologie, les normes sont regroupées sous l'appellation GPS (Spécifications Géométriques des Produits).

Normaliser c'est:

- Réduire suivant un choix judicieux le nombre d'éléments ou de produits destinés à un même usage,
- Fixer des règles pour ces produits afin d'en déterminer les caractéristiques, les formes et les dimensions à généraliser.

II.2. HISTORIQUE DE LA NORMALISATION

Suite aux réunions préparatoires dont la plus ancienne date de 1919, la **Fédération Internationale des Associations Nationales de Normalisation** (ISA) fût créée en 1926. Elle groupait à l'époque 22 comités nationaux de normalisation et a effectué de grands travaux dans différents domaines tels que les filetages, les nombres premiers, les éléments de fixation, etc...

Après une réunion à Londres, organisée par le comité de coordination de normalisation des nations unies en 1946, les délégués de 25 pays décidaient de créer une nouvelle organisation dont l'objectif serait de faciliter la coordination et réunification internationale des normes industrielles c'est **l'ISO (International Standardisation Organisation)**. Elle a donc succédé à l'ISA après la deuxième guerre mondiale, elle est entrée officiellement en fonction le 23/02/1947 et a tenu sa première assemblée générale en 1949 à Paris.

Les comités membres de l'ISO sont les comités nationaux les plus représentatifs des normalisations de leurs pays, par exemple:

ASSI	USA
BSI	GB
DIN	Allemagne
AFNOR	France
SNV	Swisse
IANOR	Algérie

II.2.1. Historique de la métrologie Algérienne

- Avant 1962 : Service des Poids et Mesures,
- 1962 à 1980 : Service des instruments de Mesure (rattaché aux directions de l'Industrie et de l'énergie),
- 1980 à 1986 : Sous direction des instruments de mesure de wilaya,
- 1986 : Création de l'Office National de Métrologie Légale,
- 2002 : Conseil National de Métrologie le 20 juin 2002.

II.3. SYSTEME INTERNATIONAL D'UNITES (SI)

Un système d'unités est un ensemble d'unités, utilisées dans un pays ou un groupe de pays et correspondant à un ensemble de grandeurs données.

Le Système International d'unités (abrégé en SI), inspiré du système métrique, est le système d'unités le plus largement employé au monde. Il s'agit d'un système d'unités décimal (on passe d'une unité à ses multiples ou sous-multiples à l'aide de puissances de 10). C'est la Conférence générale des poids et mesures, rassemblant des délégués des états membres de la Convention du Mètre, qui décide de son évolution, tous les quatre ans, à Paris.

L'abréviation de « Système International » est SI, quelle que soit la langue utilisée.

La norme internationale ISO 1000 (ICS 01 060) décrit les unités du Système International et les recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités.

II.4. LES UNITES DU SYSTEME INTERNATIONAL

II.4.1. Unités de base

C'est une unité considérée comme indépendante de toute autre unité. Elle est choisie conventionnellement comme fondement d'un système utilisant des phénomènes physiques reproductibles.

Seul le kilogramme est encore défini par rapport à un objet matériel susceptible de s'altérer.

Actuellement, des recherches ont donc lieu pour remplacer cette définition par une autre, utilisant cette fois un phénomène physique.

À l'issue de ces recherches, le kilogramme pourrait perdre son statut d'unité de base au profit d'une autre unité: c'est en effet seul le nombre d'unités fondamentales qui est imposé, puisqu'elles doivent permettre, par combinaison, de mesurer toute grandeur physique connue sans définition redondante, mais le choix précis des unités fondamentales comme les unités de masse, longueur, temps, courant électrique, température, intensité lumineuse et quantité de matière est purement arbitraire.

Les unités de base actuelles du système international sont présentées dans le tableau suivant:

Unités de base du SI

Grandeur	Unité	Abréviation
Longueur	Mètre	m
Poids	Kilogramme	Kg
Temps	Seconde	s
Intensité électrique	Ampère	A
Température	Kelvin	K
Quantité de matière	Mole	Mole
Intensité lumineuse	Candela	cd

Leurs définitions sont indiquées dans le tableau suivant:

- Longueur (unité mètre)

Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde.

Historiquement, la première définition officielle et pratique du mètre (1791) était basée sur la circonférence de la terre, et valait $1/40\,000\,000$ d'un méridien.

- Temps (unité seconde)

La seconde est la durée de $9\,192\,631\,770$ périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à la température de 0 kelvin.

La seconde était à l'origine basée sur la durée du jour terrestre, divisé en 24 heures de 60 minutes, chacune d'entre elles durant 60 secondes (soit 86 400 secondes pour une journée)

- Température (unité Kelvin)

Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction $1/273,16$ de la température

thermodynamique du point triple de l'eau.

- Masse (unité kilogramme)

Le kilogramme est la masse du prototype international du kilogramme. Ce dernier, composé d'un alliage de platine et d'iridium (90%-10%), est conservé au bureau international des poids et mesures à Sèvres, en France. Historiquement, la définition du kilogramme était la masse d'un décimètre cube d'eau (un litre).



Le kilogramme étalon

II.4.2. Unité dérivée

C'est une unité définie à partir d'un ensemble d'unités de base, ex: le Newton ($N=m.kg.s^{-2}$).

II.5. SYSTEME DE CONTROLE DE CONFORMITE

La normalisation comme déjà mentionnée, vise à mettre en application un système d'interchangeabilité. Ceci permettra à son tour, la mise en application d'une métrologie de contrôle à l'aide de vérificateurs à tolérances.

Elle favorise et facilite le contrôle de qualité en vue de garantir le public en matière de sécurité et fiabilité des produits, approbation de modèle des instruments de mesure, vérification primitive et périodique d'instruments de mesure (neufs ou réparés), surveillance, étalonnage et travaux de jaugeage (réservoirs de stockage, camion-citerne, bateaux citernes)

II.5.1. Le contrôle de conformité comprend :

- L'étude et l'essai des nouveaux modèles d'instruments de mesure en vue de leur approbation ;
- La vérification primitive des instruments de mesures neufs ou réajustés, aux fins de constater que les instruments neufs sont conformes à un modèle approuvé et que les instruments réajustés répondent aux prescriptions réglementaires ;
- La vérification périodique des instruments de mesures, ayant pour objet de s'assurer que ces instruments ont été soumis à la vérification primitive et de prescrire le rajustement ou la mise hors service de ceux qui ne remplissent pas les conditions réglementaires ;
- La surveillance permettant de constater que les instruments de mesures en service répondent aux prescriptions légales, qu'ils sont en état de fonctionnement régulier et qu'il en est fait un usage correct et loyal.

II.5.2. Métrologie légale

Ensemble des règles et exigences légales et réglementaires imposées par l'Etat concernant le système national d'unités (unités légales, la fabrication et l'utilisation des instruments de mesure

utilisés dans le domaine du commerce, de la santé, de la sécurité et la protection de l'environnement), exigences réglementaires qui s'appliquent aux mesurages, aux unités de mesure, aux instruments de mesure et aux méthodes de mesure et sont effectuées par des organismes compétents.

- L'étendue de la métrologie légale peut différer d'un pays à l'autre.
- Les organismes compétents responsables des activités de métrologie légale ou d'une partie de ces activités sont généralement appelés services de métrologie légale.

La Métrologie Légale représente l'intervention de l'Etat pour garantir la qualité des instruments de mesure ou des opérations de mesurage touchant l'intérêt public : sécurité des personnes, protection de l'environnement et de la santé, loyauté des échanges commerciaux. Ainsi, chaque instrument de mesure utilisé dans le cadre des échanges commerciaux fait l'objet d'une réglementation stricte visant à garantir l'égalité du citoyen devant cet échange.

II.5.2.1 Mission de la métrologie légale

- l'approbation des nouveaux modèles d'instrument de mesure,
- des décrets définissant les contrôles à réaliser périodiquement sur chaque type d'instrument de mesure
- des décrets définissant les Erreurs Maximales Tolérées (E.M.T) et les classes d'instruments de mesure
- des décrets définissant les fréquences auxquelles doivent être effectués ces contrôles.

II.5.3. Présentation de l'Office National de Métrologie Légale (ONML)

Etablissement public à caractère administratif (EPA), doté de l'autonomie financière sous tutelle du Ministère de l'Industrie et des mines. Créé le 30 septembre 1986, géré par un conseil d'administration à pour mission principale:

- participer à la sauvegarde de la garantie publique et à la protection de l'économie nationale sur le plan des échanges commerciaux nationaux et internationaux.
- procéder aux études et aux essais des nouveaux modèles d'instruments de mesure en vue de leur approbation
- Procéder aux vérifications primitives et périodiques des instruments de mesure utilisés dans le commerce et l'industrie
- effectuer la surveillance permettant de constater que les instruments de mesure répondent aux prescriptions légales
- élaborer la réglementation technique
- acquérir et conserver des étalons nationaux
- développer et promouvoir la métrologie.

II.5.3.1. Missions de l'Office National de Métrologie Légale (ONML)

- Participer à la sauvegarde de la garantie publique et à la protection de l'économie nationale sur le plan des échanges commerciaux nationaux et internationaux,
- Procéder aux études et aux essais des nouveaux modèles d'instruments de mesure en vue de leur approbation,
- Procéder aux vérifications primitive et périodique des instruments de mesure utilisés dans le commerce et l'industrie,
- Effectuer la surveillance permettant de constater que les instruments de mesure répondent aux prescriptions légales,
- Élaborer la réglementation technique,
- Acquérir et conserver des étalons nationaux,
- Développer et promouvoir la métrologie.

II.6. DIFFERENTS CATEGORIES DE LA METROLOGIE

II.6.1. La métrologie fondamentale ou scientifique

La métrologie fondamentale couvre tous les aspects généraux, théoriques et pratiques relatifs aux

unités de mesure, aux étalons de mesure, aux méthodes et résultats de mesure (calculs d'erreurs et incertitude), vérification du bon fonctionnement des équipements avec :

- Rendus les mesures fidèles et justes,
- Respect des spécifications du constructeur,
- Mesures fidèles : même résultat obtenu ou mesures voisines en répétant le mesurage plusieurs fois,
- Mesures justes : mesure en accord avec la valeur attendue.

Un cahier de vie accompagne chaque instrument, document qui recense toutes les caractéristiques et les interventions faites sur un instrument : date d'achat, spécifications, calibrage, réglage, réparations,

Vérification de chaque type d'appareil (balance, thermomètre, spectrophotomètre...) selon un cahier des charges :

- extrêmement précis et rigoureux,
- faisant l'objet d'une norme constructeur.

La métrologie d'un appareil est réalisée avec des matériaux de référence ou des étalons certifiés

II.6.2. La métrologie industriel

-Couvre toutes les activités métrologiques dans l'entreprise : contrôle des processus de mesure, gestion des instruments de mesure, procédures de vérification /étalonnage (traçabilité des mesures) Elle doit garantir, non pas l'honnêteté et l'égalité de l'échange, mais la fonctionnalité du produit dans un contexte économique souvent difficile. Pour cela elle dispose d'un certain nombre de normes qui l'aide dans sa démarche.

Voici quelques exemples de normes qui régissent, définissent, organisent et apportent des compétences dans le domaine de la métrologie industrielle :

- SO 9001 V2000: Maîtrise des dispositifs de surveillance et de mesure, L'organisme doit planifier et mettre en œuvre les processus de surveillance, de mesure, d'analyse et d'amélioration.
- NF ENV 13005 : Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM)
- NF EN ISO 10012 : Système de management de la mesure. Exigences pour les processus et les équipements de mesure
- NF EN ISO 14253 1 : Spécification géométrique des produits, règles de décision pour prouver la conformité ou la non conformité à la spécification.

II.6.2.1. Place de la métrologie par rapport à l'entreprise:

L'entreprise ne peut acquérir et donner l'assurance des moyens de contrôle de mesure et d'essai que si elle maîtrise la connaissance des performances exactes de ses moyens ainsi que leurs limites d'emploi et leurs comportements dans le temps.

La fonction métrologie dans l'entreprise est un investissement important qui concourt à la qualité des différents produits, de façon simple, efficace, économique et sûre. Le service métrologie est partie intégrante au service contrôle qualité.

II.6.2.2. Rôle de la fonction métrologie dans l'entreprise:

Le service de contrôle est le seul garant de la qualité des produits de l'entreprise. Il doit donc assurer :

- La conformité de tous les constituants du produit final ainsi que sa fonction finale et ce, par la mise en service de postes de contrôle éparpillés dans tous les lieux de fabrication et de montage.
- La gestion de tous les moyens de contrôle de mesure et d'essai en service,
- La maîtrise d'aptitude à l'emploi de tous les moyens de contrôle de mesure et d'essai utilisés dans l'entreprise et à en donner l'assurance, en réalisant des opérations d'étalonnage et de vérification par rapport à des données préétablies.
- La conservation et le raccordement des étalons de l'entreprise aux étalons régionaux ou nationaux,
- La surveillance qualitative à l'aide des étalons de référence qu'elle détient ou par recours à des

organismes agréés ou habilités,

- La formation des opérateurs et la sensibilisation des responsables,
- La gestion des vérifications et les étalonnages périodiques du matériel.

Son rôle consiste aussi à informer et sensibiliser les utilisateurs, d'assurer la mise à jour des documents : fiches de vie, procès verbal d'étalonnage, planning d'étalonnage, maintenir un potentiel de moyens de contrôle, de mesure et d'essai adaptés aux caractéristiques à mesurer, au volume de la production et au niveau technique recherché.

Il permet en plus, d'éviter les éventuels rebuts en intervenant au moment opportun pour réajuster les paramètres de fabrication sur les machines et contribuer ainsi à la diminution du coût du produit.

II.6.2.3. Gestion des moyens de mesure de contrôle et d'essai

La gestion des moyens de mesure recouvre l'ensemble des actions à engager pour constituer et entretenir le parc d'instruments de mesure nécessaire à la satisfaction des besoins de l'entreprise.

Cette gestion nécessite de prendre en compte :

- L'analyse du besoin et le choix des moyens de mesure,
- La réception, la mise en service et le suivi des moyens,
- L'étalonnage ou la vérification des moyens et les décisions qui en découlent.

Cette gestion doit aider l'entreprise à mieux maîtriser la connaissance des performances exactes de ses moyens, leur limites d'emploi et leur comportement dans le temps, ceci afin qu'elle puisse donner l'assurance de la qualité des opérations de mesurage qu'elle réalise.

II.6.2.4. Maîtrise de la métrologie dans l'entreprise

Les sept conseils pour maîtriser la métrologie dans l'entreprise

-Analyser ses besoins métrologiques

Les besoins métrologiques sont de deux sortes : les besoins organisationnels relatifs à la gestion de la métrologie (sont-ils suffisamment importants pour nécessiter l'implantation d'une métrologie à part entière ? Faut-il des locaux, du personnel qualifié en permanence ? Quels sont les sous-traitants les plus proches ? Faut-il tout sous-traiter ?) et les besoins matériels relatifs à la réalisation des mesures (que mesurer et avec quelle précision ? Quelles sont les méthodes de mesure possibles ? Quel instrument utiliser ? Comment garantir la qualité des mesures ?).

-Recenser son parc d'instruments

La première action à mener est de dresser la liste des équipements de mesure disponibles dans l'entreprise, sans oublier ceux qui ne servent jamais (se demander pour quelles raisons) ou ceux qui ne sont plus en état. Cet inventaire est très utile : l'importance et l'étendue du parc permet de définir la politique métrologique à mettre en œuvre ; il sert de base de données lorsqu'il faut choisir un nouvel appareil ; il peut éviter l'achat de nouveaux instruments ; il est obligatoire pour les appareils permettant d'assurer la qualité et la conformité des produits.

-Choisir le matériel à suivre rigoureusement

Faut-il appliquer la même rigueur de suivi à tous les instruments de mesure ? Non. Pour des raisons de coût. Quel critère de sélection retenir ? Lorsque l'exactitude de la mesure s'avère déterminante pour la qualité, la sécurité et la sûreté du produit, les moyens de mesure devront être suivis avec rigueur. Les autres appareils pourront être répertoriés dans un inventaire. Il faudra néanmoins, dans ce cas, s'interroger sur les conséquences éventuelles d'une dérive non détectée, évaluer ce risque en termes de probabilité et le comparer au coût total.

-Déterminer la périodicité du suivi

Il est impossible de déterminer un intervalle de temps suffisamment court pour qu'il n'y ait pas de risque de dérive d'un appareil de mesure. De plus, une fréquence d'étalonnage trop élevée est coûteuse, essentiellement parce que l'opération elle-même est chère et qu'il faut prendre en compte le manque à gagner résultant de l'immobilisation ou du remplacement de l'appareil. De même, des intervalles trop longs risquent d'empêcher de détecter suffisamment tôt une dérive. Un compromis s'avère donc souvent nécessaire. La périodicité d'étalonnage n'est d'ailleurs pas forcément

constante. Les intervalles de temps entre deux vérifications pourront être raccourcis lorsque les résultats des comparaisons précédentes ne permettent pas d'assurer l'exactitude du moyen de mesure en permanence. Ils seront rallongés si ces mêmes comparaisons indiquent que l'exactitude ne se dégrade pas.

-Métrologie interne ou externe

Pour effectuer ses raccordements aux étalons nationaux, l'industriel est conduit à faire étalonner au moins une partie de ses moyens de mesure auprès de laboratoires externes. Cependant, il peut, à partir de ses propres étalons, assurer le raccordement de ses instruments en interne, en réalisant lui-même ses étalonnages. En fait, le bon équilibre entre raccordement externe et interne dépend de la nature du parc, de l'offre de services locale, des moyens d'étalonnage disponibles, des coûts comparés des deux solutions, de la disponibilité du personnel et du niveau d'incertitude de la mesure autorisé. En pratique, mieux vaut maîtriser soi-même la métrologie la plus proche de son métier et confier à un prestataire les appareils difficiles à étalonner en interne.

-Sous-traiter

Lorsque l'entreprise décide de sous-traiter sa métrologie, elle doit s'assurer que le sous-traitant choisi répond bien aux critères de l'assurance qualité. La meilleure garantie est offerte par les sociétés disposant d'un laboratoire accrédité par le Cofrac. Pour les laboratoires non agréés, mieux vaut s'assurer par un audit que le sous-traitant possède bien les aptitudes requises. Toutefois, la sous-traitance, même quasi totale, n'exclut pas de garder des compétences internes. Bien au contraire. Ne serait-ce que pour suivre son sous-traitant, voire être capable de remettre en cause certaines de ses décisions.

-Mettre en place une gestion rigoureuse

Une gestion de parc d'instruments de mesure ne peut être performante durablement si elle n'est pas formalisée. Mais avant de créer les documents, il faut lister ceux dont on a besoin et structurer leur relation avec le système documentaire de l'entreprise. Parmi ceux-ci, le plus important est la fiche de vie de l'équipement qui assure une traçabilité complète des actions effectuées ou des événements survenus. La mise à jour des fiches de vie peut être assurée par un logiciel de gestion de parc. Attention toutefois avant de se décider, car tous ne répondent pas aux besoins des métrologues et leur coût (plusieurs dizaines de milliers de francs) ne s'amortit pas facilement.

II.7. VERIFICATION ET ETALONNAGE

Étalonner ses instruments de mesure : un des enjeux essentiels de la qualité dans l'entreprise. Interne ou sous-traitée, la maintenance d'un parc d'appareils rattachés aux étalons nationaux fait intervenir des prestataires agréés (laboratoires et centres d'étalonnage). Aujourd'hui, l'évolution des technologies exige des mesures de plus en plus complexes.

L'étalonnage consiste à donner la différence entre la valeur donnée par un instrument et une valeur étalon. Les résultats d'un étalonnage sont notés dans un rapport d'étalonnage.

La vérification va jusqu'à la décision relative au matériel en fonction des résultats (réforme, déclassement, réparation, ajustage). La vérification peut comporter un étalonnage puis la comparaison des résultats avec des valeurs maximales tolérées. La vérification périodique donne lieu à la rédaction d'un rapport de vérification.

II.7.1. Chaîne d'étalonnage

La vérification du matériel est basée sur un système de chaîne d'étalonnage qui va des étalons de l'entreprise jusqu'aux étalons nationaux.

Le plus haut niveau est représenté par le Bureau National de Métrologie qui habilite des laboratoires pour effectuer des étalonnages. La chaîne d'étalonnage est structurée par des laboratoires hiérarchisés :

-laboratoire primaire (Conservation et amélioration des étalons nationaux, étalonnage des références des Centres d'Étalonnage Agréés : tutelle technique de la chaîne d'étalonnage)

- Centres d'Étalonnage Agréés (Étalonnage (rôle de service public) et délivrance de certificats officiels)
- Services de Métrologie Habilités (Étalonnage pour les besoins propres d'une société ou d'un organisme)
- Service de métrologie de l'entreprise

L'étalonnage résulte de la comparaison entre des étalons de niveaux de précision d'autant plus élevée qu'on est en haut de la chaîne. En haut de la chaîne, on retrouve les étalons nationaux qui peuvent être uniques comme le kilogramme étalon ou qui peuvent être reconstitués par des moyens physiques comme le mètre.

II.7.2. Environnement

L'environnement dans lequel les étalonnages et vérifications sont exécutés ne doit pas compromettre l'exactitude des mesures effectuées et par conséquent être adapté aux caractéristiques métrologiques des moyens concernés. Les locaux protégés des conditions ambiantes excessives (température, humidité, pression,...) doivent être équipés de dispositifs de surveillance de ces conditions d'environnement.

Les conditions de mesure sont :

- Température : 20 °C;
- Pression atmosphérique : 101 325 Pa (1,01325 bar),
- Pression partielle de vapeur d'eau : 1333 Pa correspondant approximativement à une humidité relative de 55 %.

Pour les étalonnages ou les mesures industrielles, la température agit sur la dimension de la pièce à cause de la dilatation.

Des variations de la température, de la pression atmosphérique et de l'hygrométrie influent sur les résultats des mesurages optiques par suite de la variation de l'indice de réfraction de l'air.

Un taux d'hygrométrie trop élevé peut d'autre part affecter des pièces en acier (oxydation) et les variations de ce taux affectent les dimensions des pièces pour certaines matières plastiques.

II.8. PROCÉDES DE MESURE

L'instrument de mesure n'est qu'un maillon dans le processus d'obtention d'un résultat de mesurage. Le procédé peut se définir comme l'ensemble constitué par :

- Un principe de mesure
- La Méthode de mesurage
- Mode opératoire
- Instrumentation adéquate
- Des étalons
- Un environnement (Température, Pression, humidité, vibration .etc.)

Le procédé de mesure permet l'obtention d'un produit qui est le résultat de mesurage.

II.9. GESTION DES MOYENS DE MESURE

Lors de mesurage intervient une grandeur de référence, la normalisation actuelle oblige que ces grandeurs de référence soient les mêmes aussi bien en Algérie que dans d'autres coins du monde.

LNM : Laboratoire National de Métrologie, Son rôle est :

- De conserver les étalons nationaux,
- De travailler à l'amélioration des étalons

B.I.P.M : Bureau International des Poids et Mesures, Son rôle est d'assurer la cohérence du système d'unités au niveau de l'ensemble des pays adhérents.

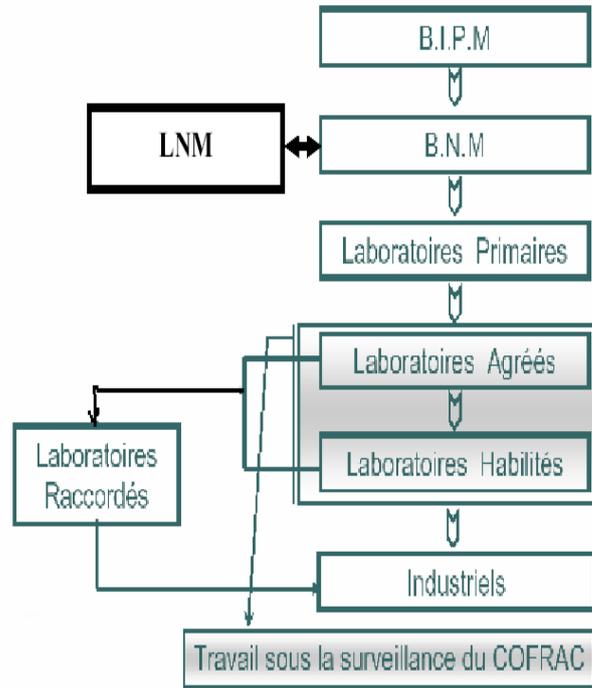
BNM : Bureau National de Métrologie, Son rôle est d'assurer la cohérence du système d'unités au niveau national.

Laboratoires Agréés: Laboratoire ou organisme public délivrant des certificats officiels d'étalonnage :

- raccordement des références des utilisateurs aux étalons nationaux,
- conseil, formation et assistance technique.

Laboratoires Habilités: Laboratoire d'une société ou d'un organisme dont le potentiel technique est reconnu officiellement par le COFRAC Section Étalonnage :

- étalonnage des étalons de référence et des instruments de mesure,
- conseil, formation et assistance.



II.10. TERMINOLOGIE ET DEFINITIONS

II.10.1. Généralité

Les normes précisent un grand nombre de termes, dont le sens varie parfois selon le domaine d'application. La courte liste suivante resserre l'éventail des possibilités, pour l'application qui nous concerne en mécanique.

Les définitions d'un certain nombre de termes métrologiques généraux sont extraites du vocabulaire international des termes généraux et fondamentaux de métrologie provenant principalement de la Norme internationale ISO 3534-1.

-Grandeur (mesurable)

C'est une caractéristique d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué qualitativement par un nom (en métrologie dimensionnelle : longueur, temps, masse, concentration en quantité de matière...) et déterminé quantitativement par une valeur (nombre exprimé dans l'unité choisie : longueur d'une tige donnée). C'est aussi un paramètre qui doit être contrôlé lors de l'élaboration d'un produit ou de son transfert. Exemple : pression, température, niveau.

Les grandeurs qui peuvent être classées les unes par rapport aux autres en ordre croissant (ou décroissant) sont appelées grandeurs de même nature.

Les grandeurs de même nature peuvent être groupées ensemble en catégories de grandeurs, par exemple : travail, chaleur, énergie ou épaisseur, circonférence, longueur d'onde

-Valeur (d'une grandeur)

Expression quantitative d'une grandeur particulière, généralement sous la forme d'une unité de mesure multipliée par un nombre

Exemple : Longueur d'une tige: 5,34 m ou 534 cm.

-Mesurage

C'est l'ensemble des opérations permettant d'attribuer une valeur à la grandeur mesurée. Le déroulement des opérations peut être automatique.

-Mesurande

Grandeur particulière soumise à mesurage

Exemple : Pression de vapeur d'un échantillon donné d'eau à 20 °C.

La définition du mesurande peut nécessiter des indications relatives à des grandeurs telles que le temps, la température et la pression.

-L'unité de mesure

C'est une grandeur particulière, définie et adoptée par convention, à laquelle on compare les autres grandeurs de même nature pour les exprimer quantitativement par rapport à cette grandeur.

-Grandeur d'influence

Grandeur qui n'est pas le mesurande mais qui a un effet sur le résultat du mesurage

Exemple : Température d'un micromètre lors de la mesure d'une longueur, fréquence lors de la mesure de l'amplitude d'une tension électrique alternative.

-Résultat d'un mesurage

Valeur attribuée à un mesurande, obtenue par mesurage.

Une expression complète du résultat d'un mesurage comprend des informations sur l'incertitude de mesure.

-La mesure (x)

C'est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise pour unité. Exemple: 2mètres, 400grammes, 6secondes.

Exemple : On ne peut pas mesurer des grammes avec des mètres, ce n'est pas homogène.

-Essais

Ensemble d'opérations, également accompagnées fréquemment de mesurages, pour la détermination des propriétés de produits.

-Mesure matérialisée

Dispositif destiné à reproduire ou à fournir, d'une façon permanente pendant son emploi, une ou plusieurs valeurs connues d'une grandeur donnée. Les cales étalon et les calibres à limites sont des exemples de mesures matérialisées.

-Dimension

C'est la distance la plus courte entre deux points réels ou fictifs

Exp. : Un diamètre, un entraxe.

-Système de mesure

C'est un ensemble des instruments de mesure assemblé pour faire un mesurage spécifique. Un système de mesure à demeure (non portable) est appelé installation de Mesure.

-Instrument de mesure ou appareils de mesure

Dispositif destiné à être utilisé pour faire des mesurages, seul ou associé à un ou plusieurs dispositifs annexes.

-Instruments d'essais

Instruments de mesure et moyens auxiliaires nécessaires aux essais ainsi que d'une manière générale les dispositifs servant à déterminer une caractéristique d'un produit ou d'un matériau. Les moyens auxiliaires comprennent en particulier l'infrastructure métrologique nécessaire à l'exploitation des instruments de mesure.

-Appareils mesureurs

Dispositif destiné à faire un mesurage, seul ou en conjonction avec d'autres équipements.

-Méthode de mesure

Fondée sur un principe de mesure, une méthode de mesure décrit l'ensemble des opérations nécessaires à la réalisation du mesurage. On lui associe un mode opératoire qui spécifie les différentes opérations lors de l'exécution de la méthode de mesure.

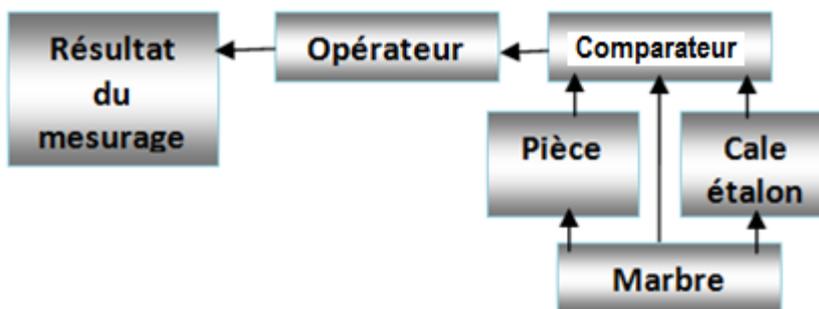
C'est l'ensemble des opérations théoriques et pratiques mises en œuvre lors de l'exécution de mesurages, selon un principe donné.

Méthode direct : La valeur de la grandeur mesurée est obtenue directement.

Exemples : mesurage d'une longueur avec une règle à traits, pied à coulisse ou micromètre.



Méthode indirect : C'est le relevé à l'aide d'un capteur de l'écart entre une pièce à mesurer et un étalon (pièce de référence).



-Contrôle

Un contrôle consiste à mesurer, examiner, essayer ou passer au calibre une ou plusieurs caractéristiques d'un instrument de mesure, et de comparer les résultats aux exigences spécifiées en vue de déterminer si la conformité est obtenue pour chacune de ces caractéristiques.

-Les définitions du contrôle

Lot: Quantité définie d'une marchandise déterminée, fabriquée ou produite dans des conditions présumées conformes.

Contrôle de réception: a) Contrôle effectué sur un lot pour lequel une opération de production est terminée, par exemple avant passage d'une opération de production à la suivante. Le contrôle effectué lorsque la totalité des opérations de produit est terminée s'appelle « contrôle final »

b) Contrôle des produits livrés, effectué par le client.

Contrôle à 100%: Contrôle de toutes les pièces ou de la totalité de la matière d'un lot.

Echantillonnage: Prélèvement d'échantillons.

Echantillonnage simple: Procédé d'échantillonnage qui consiste à ne prélever qu'un seul échantillon par lot

Echantillonnage double: Procédé d'échantillonnage qui consiste à prélever un second échantillon selon l'information donnée par le premier échantillon.

Control normal: Contrôle utilisé lorsqu'il n'y a pas de raison de penser que le niveau de la qualité de la fabrication diffère du niveau prévu.

Contrôle réduit: Contrôle moins sévère que le contrôle normal auquel on passe lorsque les résultats du contrôle d'un certain nombre de lots permettent de penser que le niveau de qualité de la fabrication est élevé.

Contrôle renforcé: Contrôle plus sévère que le contrôle normal auquel on passe lorsque les résultats du contrôle d'un certain nombre de lots permettent de penser que le niveau de qualité de la fabrication est bas.

Probabilité d'acceptation: Probabilité qu'un lot de quantité donnée soit accepté par application d'un plan d'échantillonnage déterminé.

-Contrôle dimensionnel

C'est l'ensemble des opérations permettant de déterminer si la valeur d'une grandeur se trouve bien entre les limites de tolérance qui lui sont imposées. On distingue deux types de contrôle :

Le contrôle par attribut: Il est limité à une simple vérification de conformité (réponse par oui ou non, pas de mesurage)

Applications : calibres fixes, montages de contrôle

Le contrôle par mesurage: Où l'on procède d'abord à un ou plusieurs mesurages pour quantifier les grandeurs et ensuite à une comparaison des valeurs mesurées avec les spécifications demandées. Pour palier à ce problème, la norme ISO 14253-1 préconise de déduire de la spécification l'incertitude de mesure

Valeur vraie : C'est la valeur qui caractérise une grandeur parfaitement définie dans les conditions qui existent lorsque cette grandeur est examinée. Il s'agit d'une notion idéale, la valeur vraie ne peut être connue exactement et ceci quelle que soit la précision des moyens de métrologie utilisés.

Valeur conventionnellement vraie : C'est la valeur d'une grandeur que l'on substitue à la valeur vraie. La valeur conventionnellement vraie est considérée comme suffisamment proche de la valeur vraie pour que l'on considère que la différence (entre ces deux valeurs) n'est plus significative pour l'utilisation que l'on veut en faire.

Exemples :

-valeur mesurée avec une très grande précision dans un laboratoire de métrologie.

-valeur indiquée sur une cale étalon.

-L'étalonnage

Étalon : Mesure matérialisée, appareil de mesure ou système de mesure, destinés à définir, réaliser, conserver ou reproduire une unité ou une ou plusieurs valeurs connues d'une grandeur pour les transmettre par comparaison à d'autres instruments de mesure.



Cale étalon



boite de cale étalons

Classes des cales étalons

La classification est suivants l'incertitude sur la longueur de cale étalon mesurée)

(4 Classes : Classe 0 ; Classe 1 ; Classe 2 ; Classe k)

On définit plusieurs types d'étalons :

Étalon primaire (Classe k):

Étalon qui est désigné ou largement reconnu comme présentant les plus hautes qualités métrologiques et dont la valeur est établie sans se référer à d'autres étalons de la même grandeur.

Étalon de référence (Classe 0):

Étalon, en général de la plus haute qualité métrologique disponible en un lieu donné ou dans une organisation donnée, dont dérivent les mesurages qui y sont faits.

Étalon de transfert (Classe 1):

Étalon utilisé comme intermédiaire pour comparer entre deux étalons.

Note : Le terme dispositif de transfert doit être utilisé lorsque l'intermédiaire n'est pas un étalon.

Étalon de travail (Classe 2):

Étalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des mesures matérialisées, des appareils de mesure ou des matériaux de référence.

NB : Un étalon de travail est habituellement étalonné par rapport à un étalon de référence. Un étalon de travail utilisé couramment pour assurer que les mesures sont effectuées correctement est appelé étalon de contrôle.

Courbe d'étalonnage

Elle est propre à chaque appareil. Elle permet de transformer la mesure brute en mesure corrigée. Elle est obtenue en soumettant l'instrument à une valeur vraie de la grandeur à mesurer, fournie par un appareil étalon, et en lisant avec précision la mesure brute qu'il donne.

Exemple : Lors de l'essai d'un manomètre à tube de Bourdon, nous avons relevé le tableau de mesure suivant :

G étalon	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
G mesuré	0	100	220	320	410	490	580	670	780	900	1000

L'ensemble des opérations établissant dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs de la grandeur indiquées par un appareil de mesure ou un système de mesure, ou les valeurs représentées par une mesure matérialisée ou par un matériau de référence et les valeurs correspondantes de la grandeur réalisées par des étalons.

Note :- Le résultat d'un étalonnage permet soit d'attribuer aux indications les valeurs correspondantes du mesurande, soit de déterminer les corrections à appliquer aux indications.

- Un étalonnage peut aussi servir à déterminer d'autres propriétés métrologiques telles que les effets de grandeurs d'influence.

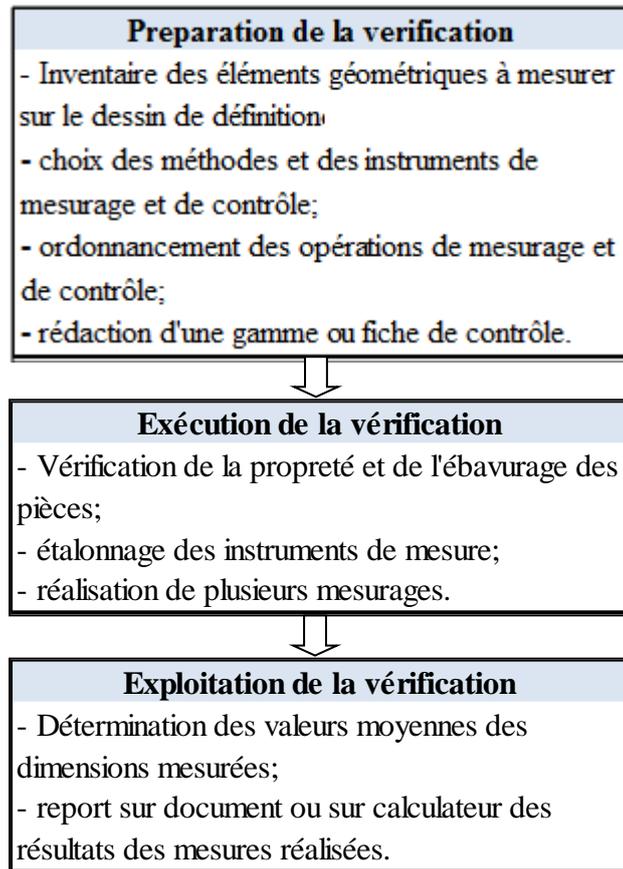
- Le résultat d'un étalonnage peut être consigné dans un document parfois appelé certificat d'étalonnage ou rapport d'étalonnage.

-Préparation de la vérification

Définitions

Vérification : la vérification a pour but de confirmer par mesurage et/ou contrôle que les exigences indiquées sur le dessin de définition ont été satisfaites.

Procédure de mise en œuvre



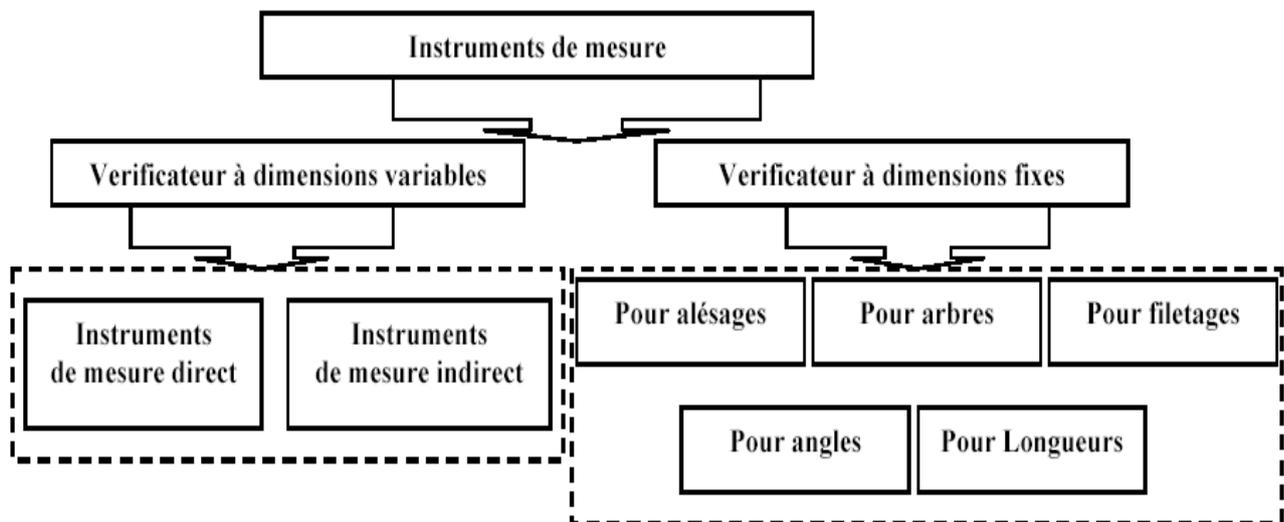
III. CLASSIFICATION DES INSTRUMENTS DE MESURE

III.1. INTRODUCTION

La mesure est une étape cruciale dans l'acquisition scientifique de la connaissance et l'instrument de mesure est un composant incontournable de tout système de mesure. La qualité d'une mesure est donc de façon primordiale déterminée, d'une part, par le choix judicieux de l'instrument et, d'autre part, par l'exploitation pertinente de leurs qualités métrologiques.

Un appareil de mesure comporte un ou plusieurs dispositifs d'amplification mécanique ou électronique, probablement des transmetteurs et des transformateurs de mouvement, et certainement un dispositif d'affichage et de lecture du résultat du mesurage.

Les moyens de contrôle et de vérification se divisent en deux grandes classes : les instruments de mesure à dimensions variables et les vérificateurs à dimensions fixes.



- les instruments de mesure à dimensions variables : sont divisés en instruments par comparaison et instruments de mesure directe (par affichage). Les instruments par comparaison produisent une représentation de la taille de la mesure, la distance fixe entre deux surfaces (cales étalon) ou la position d'un angle entre deux surfaces (rapporteur). Les instruments par affichage disposent de repères mobiles, de cadrans gradués ou de compteurs (aiguilles, vernier). La valeur de la mesure peut immédiatement être lue.

- les instruments de mesure à dimensions fixes : sont divisés en deux groupes : les instruments de mesure, les jauges et les moyens auxiliaires.

- Les jauges représentent soit la cote, soit la cote et la forme demandées d'une pièce.

- Les moyens auxiliaires sont par exemple les supports d'instruments et les prismes.

Équipements disponibles au laboratoire

Pied à coulisse, Micromètre, Projecteur de profil, Comparateur mécanique, Rapporteur d'angles, Micromètre de profondeur, Machine à mesure de coordonnées, Pâte pour faire des empreintes-marbre, Jauge d'épaisseur, Jauge télescopique, Compas extérieur, Compas intérieur, Cales étalons, Barre sinus, Micromètre à diamètre....

III.2. INSTRUMENTS DE MESURE A DIMENSIONS VARIABLES

III.2.1. Instruments de mesure directe

III.2.1.1. Les pieds à coulisse

Description:

C'est une règle rigide avec une graduation millimétrique et portant un bec fixe. Sur cette règle glisse

un coulisseau muni d'un vernier et d'un bec mobile.

Le coulisseau possède à sa partie supérieure une vis de pression qui permet l'immobilisation sur la règle et un lardon qui permet le réglage du jeu. Lorsque le pied à coulisse est fermé, le trait zéro du vernier s'aligne sur le trait zéro de la graduation de la perche.

Les pieds à coulisse se prêtent particulièrement bien aux mesures rapides, ce d'autant plus qu'ils permettent de mesurer l'extérieur, l'intérieur et la profondeur d'une pièce. En raison des possibilités multiples de mesure, de leur exécution simple et de leur maniement facile, ce sont les instruments le plus utilisés dans la métrologie.



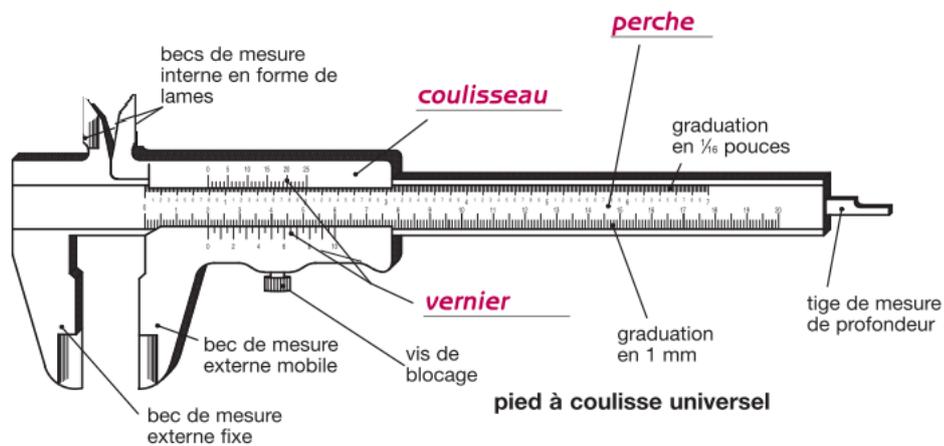
Pied à coulisse mécanique



Pied à coulisse à cadran



Pied à coulisse digital



Lecture

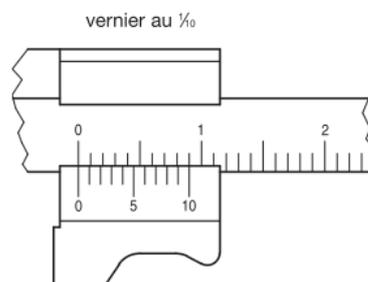
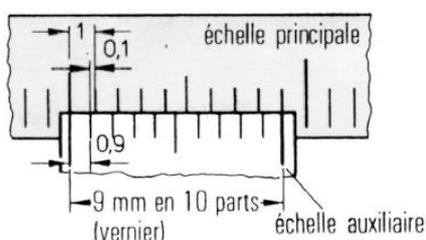
Sur un vernier au dixième, 9 mm sont divisés en 10 sections. La distance d'un trait à l'autre de l'échelle du vernier est donc de $9/10 \text{ mm} = 0.9 \text{ mm}$, tandis que la division de la graduation principale sur la perche est de 1 mm. Il en résulte une différence de division de $1 \text{ mm} - 0.9 \text{ mm} = 0.1 \text{ mm}$. Cette différence de graduation est appelée la valeur du vernier. Elle correspond à la valeur de la graduation sur des instruments de mesure à cadran.

Pied à coulisse avec une précision de lecture au 1/10 de millimètre

Sur le vernier au 1/10 eme, 9 mm sont partagé en 10 parties valant chacune 0,9 mm.

Sur la règle, chaque graduation vaut 1 mm.

Chaque écart d'une graduation entre la règle et le coulisseau vaut : $1 \text{ mm} - 0,9 \text{ mm} = 0,1 \text{ mm}$ soit 1/10eme

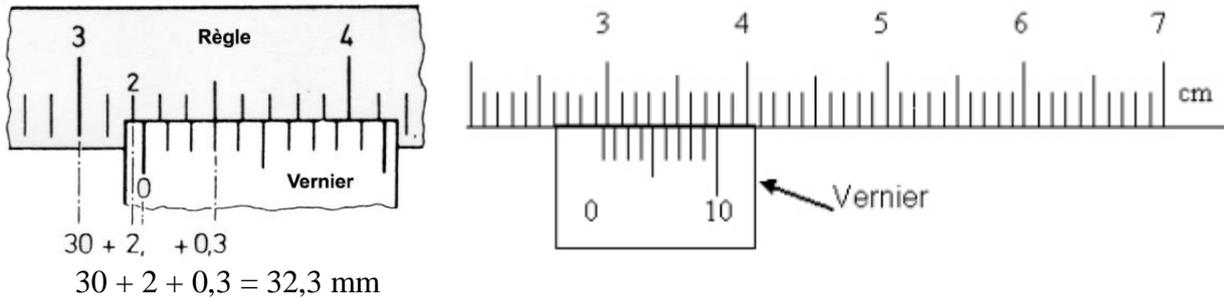


Exemple de lecture :

Si le 0 du vernier était juste en face de la graduation 2 de la règle, la lecture serait : 32 mm (exactement). Dans le schéma, le 0 du vernier se trouve à droite du 2 de la règle ; la mesure est donc de plus de 32 mm.

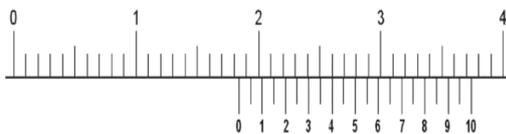
Pour avoir la mesure exacte, il suffit de regarder quelle graduation du vernier se trouve exactement en face d'une graduation de la règle ici, c'est la graduation 3.

La mesure exacte est donc de 32,3mm

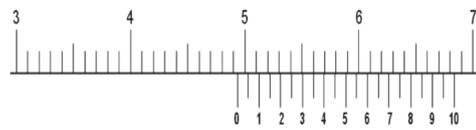


Pied à coulisse avec une précision de lecture au 1/20 de millimètre

Sur le vernier au 1/20^{ème}, ce sont 19 mm partagés en 20 parties et valant chacune 0,95 mm. Sur la règle, chaque graduation vaut 1 mm. Chaque écart d'une graduation entre la règle et le coulisseau vaut : 1mm - 0,95mm soit 0,05 mm soit 1/20



Cote relevée : 18.40 mm



Cote relevée : 49.35 mm

Pied à coulisse avec une précision de lecture au 1/50 de millimètre

Sur le vernier au 1/50^{ème}, ce sont 49 mm partagés en 50 parties et valant chacune 0,98 mm. Sur la règle, chaque graduation vaut 1 mm. Chaque écart d'une graduation entre la règle et le coulisseau vaut : 1mm - 0,98mm = 0,02 mm soit 1/50^{ème}.

Exemple de lecture :



Cote relevée : 11.60 mm



Cote relevée : 6.12 mm

Utilisation et entretien du pied à coulisse

Le pied à coulisse est un instrument de précision et à ce titre, il ne peut fournir d'indications exactes que s'il est en parfait état et manipulé avec toutes les précautions qui s'imposent, pour cela:

-Ne pas pincer fortement les becs sur la pièce à mesurer

-Il faut éviter de le choquer et de le placer avec directement avec l'outillage à main

-En règle générale, si vous n'avez pas le pied à coulisse dans la main pour effectuer une mesure, le pied à coulisse doit être dans son étui de protection.

III.2.1.2. Instrument de mesure similaire au pied à coulisse

Trusquin

Permet le tracé d'une ligne parallèle à une surface de référence par déplacement en appui sur cette surface. Celle-ci peut être un côté de la pièce tracée ou une surface de référence externe (marbre) sur laquelle se positionne la pièce à tracer, directement ou avec des accessoires de positionnement (vé).



Trusquin mécanique



Trusquin digital



Trusquin à cadran

Jauges de profondeur

Les pieds de profondeur permettent de mesurer ou de contrôler une profondeur.



Jauges de profondeur mécanique



Jauges de profondeur à cadran



Jauges de profondeur digital

III.2.1.3. Micromètres

Le micromètre est un appareil permettant de lire la dimension d'une pièce à 0,001 mm près (il est donc plus précis que le pied à coulisse). On peut mesurer des arbres ou des alésages suivant que le micromètre est extérieur ou intérieur (respectivement). Il est parfois appelé palmer, du nom de son inventeur Jean-Louis Palmer en 1848.

Dans la partie cylindrique d'un corps en acier forgé, dont la forme générale est celle d'un C, se visse

la partie filetée d'une touche mobile. Cette touche filetée peut recevoir le mouvement de rotation, soit de la douille moletée, soit du bouton également moletée du système de friction.

Précision de mesures

Le micromètre est un instrument beaucoup plus précis que le calibre à coulisse. Grâce à la touche mobile à vis micrométrique au pas de 0,5 mm, la précision de lecture est de 1/100 de mm.

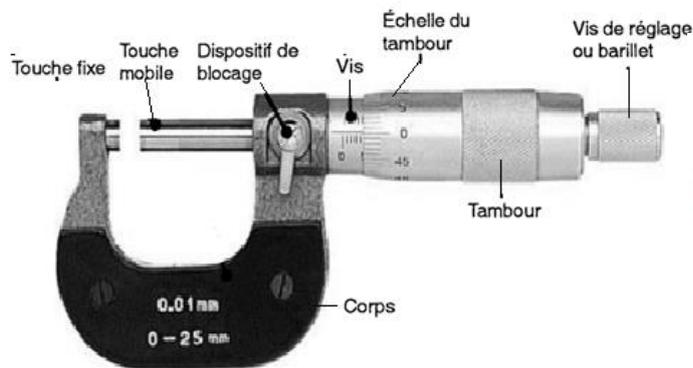
D'autre part :

- Les erreurs résultant de l'inégalité de pression de l'appareil sur les pièces à mesurer se trouvent éliminées par le système de friction.
- Les déformations de l'appareil sont négligeables, le corps pouvant avoir une section suffisante pour rendre toute flexion impossible.
- Les incertitudes de lecture sont très faibles, puisqu'une variation de cote de 1/100 de mm nécessite la rotation de la douille de la valeur d'une division.

La graduation des micromètres

Avec les instruments à lecture numérique, il est possible de mémoriser la mise à zéro pour des mesures comparatives, de mémoriser des données ou de les transmettre à un ordinateur pour la documentation.

La graduation de ces micromètres permet un affichage digital de 0.001 mm.



Micromètre mécanique



Micromètre à affichage digital

La course entre broche et enclume est limitée à 25 mm pour des raisons de précision de fabrication (micromètre de 0 à 25 mm, 25 à 50 mm, 50 à 75 mm, etc.).

Un micromètre classique comporte :

- Un corps en acier estampé formant étrier.
- Une douille graduée de 1 mm en 1 mm, solidaire du corps (pour étalonner le micromètre, cette douille peut être déplacée par rapport au corps)
- Un tambour gradué en 50 parties égales de façon que chaque division fasse 1/100 de millimètre ; le tambour est solidaire de la broche.
- Une broche trempée rectifiée comportant une partie lisse et la vis micro-métrique de pas de 0,5 mm, donc 2 tours de broche pour 1 mm.
- Une enclume ou touche fixe en acier trempé rectifié.
- Une friction entraînant la broche et le tambour.
- Un écrou moleté de blocage de la broche

Observez les pièces suivantes de l'instrument :

Mécanisme de mesure

- bords : touche fixe et touche mobile — pour mesurer de petites distances
- une échelle sur la vis (échelle fixe)
- une échelle sur le tambour (échelle mobile)

Graduation (1/1000)

- Vis : l'échelle fixe de la vis compte 25 grandes divisions. Chaque grande division représente 1 mm.

Chaque grande division est divisée en deux, ce qui donne 50 subdivisions en tout. Chacune de ces subdivisions représente 0,05 cm, soit 0,50 mm.

-Tambour : l'échelle mobile du tambour compte 50 divisions. Une rotation complète du tambour représente $50 \times 0,01 = 0,50$ mm. Par conséquent, chaque division du tambour représente $1/1000$ cm, soit 0,01 mm

Précautions à prendre

-Ne jamais utiliser le tambour vernier pour mettre en contact les touches de mesure avec la pièce à mesurer (risque de détérioration du micromètre et d'erreur de lecture)

-Utiliser obligatoirement et exclusivement la friction pour mettre en contact les touches de mesure avec la pièce à mesurer.

Etalonnage

Pour le micromètre 0-25, serrer la broche contre l'enclume à l'aide de la friction, pour les micromètres 0-50 et plus, utiliser la pige rectifiée dont la longueur est une cote exacte.

Si le zéro « 0 » du vernier ne coïncide pas avec le trait de la douille graduée, utiliser l'outil de réglage pour tourner cette douille graduée de manière à amener son trait horizontal en face du « 0 » du vernier.

Utilisation d'un micromètre

Vous allez vous exercer à mesurer à l'aide d'un micromètre en trouvant la largeur de différents objets. Placez un petit objet, tel un clou, entre les becs, puis faites tourner le tambour à l'aide du bouton à friction jusqu'à ce que l'objet soit immobilisé et que vous entendiez trois déclics. On effectue la lecture des micromètres métriques au $1/10$ mm près.

Méthode générale de lecture

- Compter le nombre de graduations qui indiquent les millimètres,

- Regarder si après la graduation des millimètres, une graduation des $\frac{1}{2}$ millimètres apparaît ou non.

Cas 1 : la graduation n'apparaît pas, lire le nombre de centièmes affichés sur le vernier et les ajouter à la lecture des millimètres

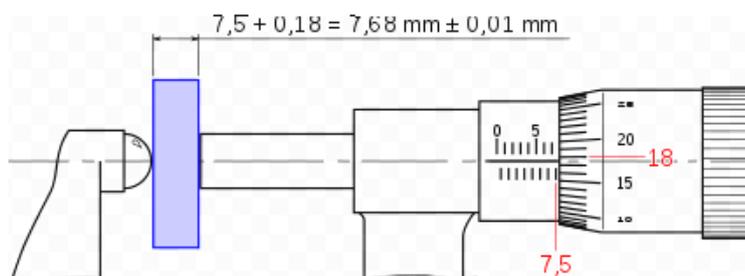
Cas 2 : la graduation est juste en face du tambour vernier qui à lui même sa graduation « 0 » en face du trait horizontal (figure ci dessus), lire le nombre de mm et ajouter un $\frac{1}{2}$ mm soit 50/100 de mm.

Cas 3 : La graduation des $\frac{1}{2}$ mm est visible et les graduations du tambour indiquent une valeur positive en regard du trait horizontal de la douille graduée, lire le nombre de mm, ajouter 50/100 de mm de la graduation des $\frac{1}{2}$ mm et ajouter enfin le nombre de 100 eme de mm lus sur le tambour vernier par rapport à la barre horizontale de la douille graduée.

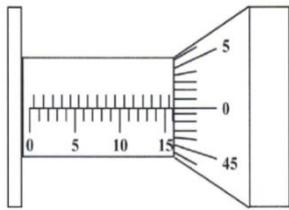
Micromètre vis au pas de 0,5 mm :

Le tambour est gradué en 50 parties égales représentant chacune $1/100$ de mm. On additionne le chiffre lu sur le tambour à celui de la graduation.

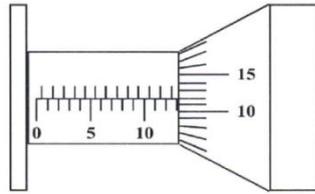
La figure ci-contre donne un exemple de micromètre intérieur. On est entre 65,5 et 66. On lit $27/100$ de mm sur le tambour. La mesure vaut donc : $65,5 + 0,27 = 65,77$ mm. Cette mesure est plus précise que celle du pied à coulisse.



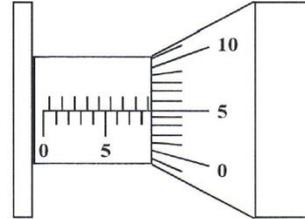
Exemple de lecture :



Cote relevée : 16 mm



cote relevée : 13,12 mm



cote relevée : 8,55 mm

III.2.1.4. Instrument de mesure similaire au micromètre

Les micromètres d'intérieur

Micromètre intérieur permet de mesurer les perçages et les alésages par deux points.



Micromètre d'intérieur



Micromètres Palmer d'intérieur

Les alésomètres

Micromètre à 3 touches utilisé généralement pour contrôler le diamètre d'un alésage pour des mesures précises de 3,5 à 300 mm.



Alésomètres micromètres mécanique



Alésomètres micromètres digital

Les jauges de profondeurs micrométriques



Les jauges de profondeurs micrométriques



Les jauges de profondeurs micrométriques digital

III.2.1.5. Rapporteurs d'angle

Les surfaces coniques de révolution, les queues d'arondes et les surfaces obliques jouent un rôle important dans les assemblages démontables, les outils de coupe, les positions relatives des pièces dans différents dispositifs en mécanique, rendent nécessaire l'existence de moyens adéquats pour leur vérification.

Pour effectuer des mesurages d'angles, il y a lieu de distinguer s'il s'agit d'angles extérieurs ou intérieurs et de faire le choix de la méthode de mesure qui conviendra au mieux entre:

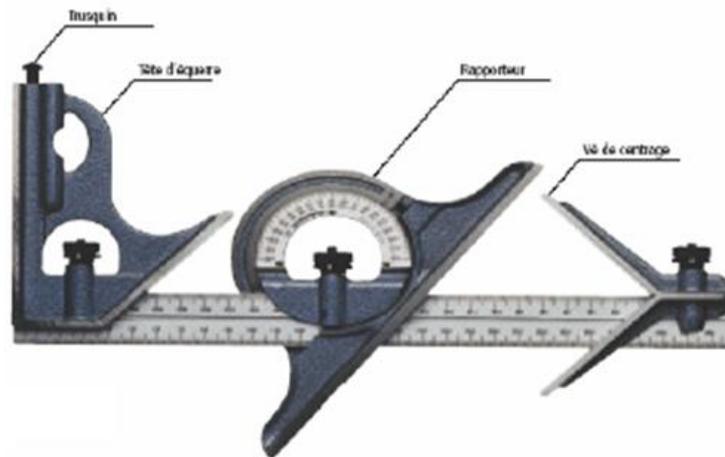
- **Méthodes directes** où la grandeur en question est mesurée directement à l'aide d'un instrument de mesure convenable;
- **Méthodes indirectes** où la grandeur en question est obtenue par calcul trigonométrique sur les résultats des mesurages de certaines côtes appropriées.

Rapporteurs d'angle universels

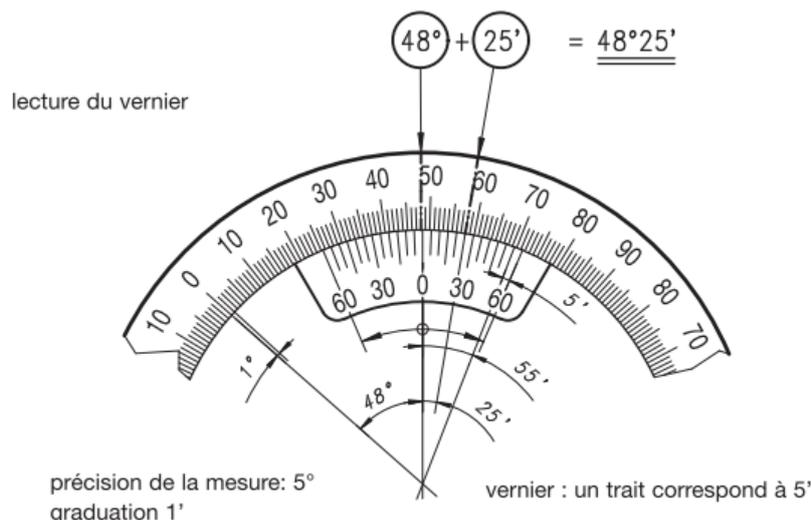
Le rapporteur d'angle universel est un instrument de mesure des angles extérieurs. Il est constitué de deux règles en acier inoxydable qui prennent appui sur les côtés matérialisant l'angle. Ces règles sont assemblées à un disque sur lequel est imprimée une échelle de degrés. Pour augmenter la résolution, on se sert d'un vernier associé au disque gradué.

Les règles de lecture des rapporteurs d'angle universels

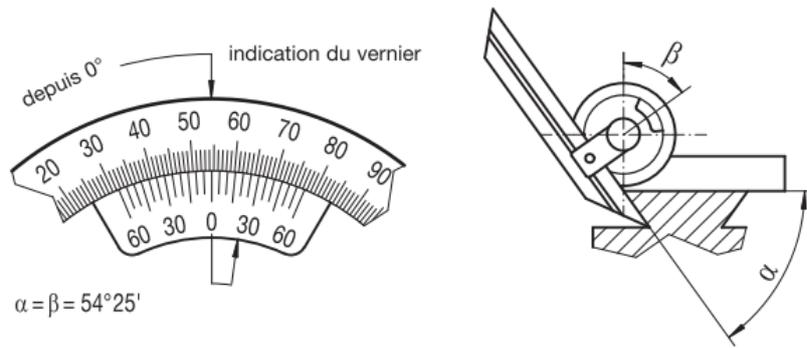
- On relève en premier les degrés entiers sur la graduation principale à partir de 0° jusqu'au trait zéro du vernier.
- Ensuite, on lit dans la même direction de lecture les minutes sur le vernier.



Exemple de lecture :

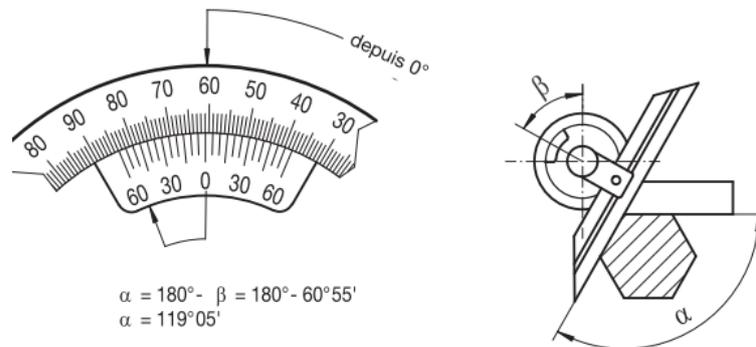


Exemple : angle aigu

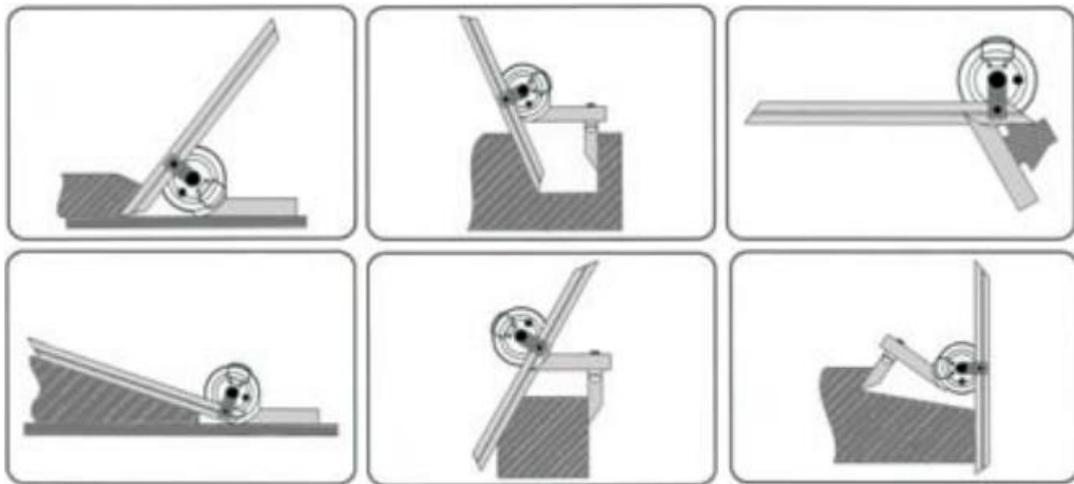


Exemple : angle

obtus



Mode d'emploi



III.2.1.6. Instrument de mesure similaire au Rapporteurs d'angle

Rapporteur d'angle universel



Rapporteur d'angle universel, avec lecture de l'heure



Rapporteur d'angle universel digital

Capteur angulaire



Mesureur d'angle universel



Inclinomètre digital électronique

III.2.2. Instruments de mesure indirecte

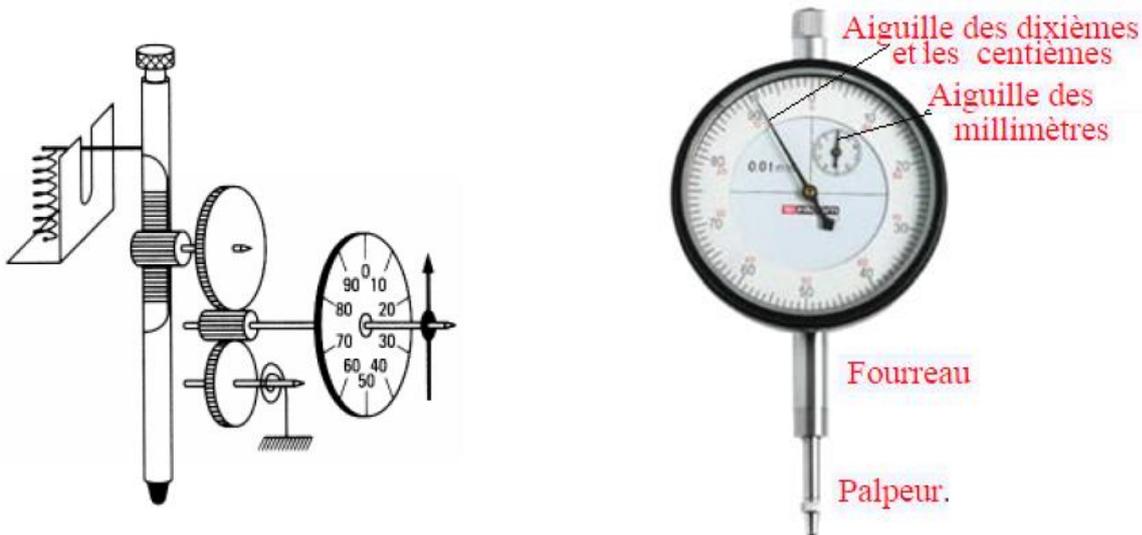
III.2.2.1. Le comparateur

Ce sont des instruments de comparaison entre deux grandeurs de faible différence.

Les déplacements du palpeur d'un comparateur sont transmis par un système de pignon crémaillère à une aiguille se déplaçant devant un cadran circulaire gradué.

Un comparateur est caractérisé par:

- Son étendue de mesure, généralement faible 3.5 ou 10 mm;
- Sa résolution, couramment 0.01 ou 0.001 mm;
- La forme du palpeur, sa touche est changeable en vu d'adapter la forme convenable à la pièce envisagée;
- L'effort de mesurage est de l'ordre de 1.5 N.



Principe de fonctionnement

Pour un déplacement de 1 mm du palpeur lié à la crémaillère, l'aiguille liée au pignon terminal de la chaîne cinématique fait 1 tour. Le cadran étant divisé en 100 graduations, chaque graduation est égale à : $1 \text{ mm}/100$, soit 0,01 mm.

Principales utilisations

- Mesurer l'écart e entre un étalon et une pièce à mesurer.
- Réaliser les différents réglages géométriques sur la machine.

Conditions normales d'utilisation

- Vérifier, avant usage, la fidélité de réponse (retour à la même graduation).
- Vérifier le vissage du palpeur.
- Réduire les porte-à-faux lors du montage du comparateur sur le support (ci-contre).

Types de comparateurs



Comparateur à cadran

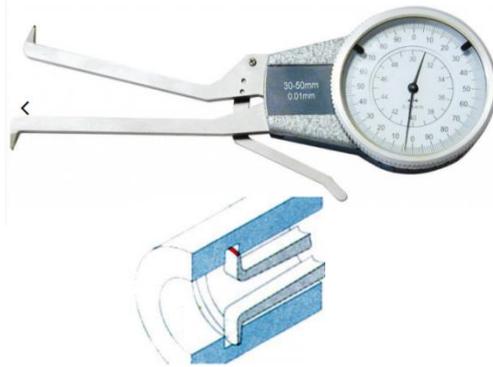


Comparateur à cadran numérique

Vu ses diverses applications, le comparateur se présente sous différents types, on peut trouver en pratique:



Comparateur à cadran métrique



Palpeur intérieur



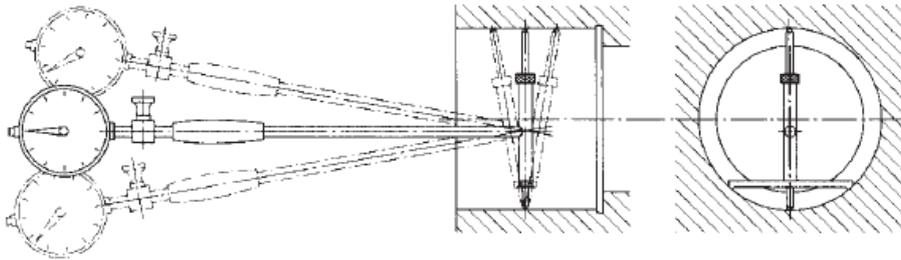
Jauges d'épaisseur

Les instruments travaillant par comparaison se prêtent pour mesurer des alésages. La bague-calibre représentée est utilisée pour l'étalonnage.



Schéma de principe d'une mesure avec un instrument travaillant par comparaison.

Palpeur intérieur utilisé pour la mesure de diamètres ou côtes internes variés. Le palpeur d'intérieur contrôle, par affichage analogique, des trous ou des rainures et peut vérifier un alésage grâce à ses touches.



III.3. INSTRUMENTS DE MESURE A DIMENSIONS FIXES

Les moyens de contrôle en cours de fabrication pour les angles sont limités. On trouve les angles étalons pour les angles extérieurs (équerre, étalon 45°, 60°, 120°, 135°,...) et seulement le calibre tampon pour les angles intérieurs.

Le contrôle se fait par simple pénétration du cône qui doit être enduit de poudre ou de teinte, pour contrôler les défauts géométriques intérieurs car la teinte en contact avec les milieux défectueux, ne sera pas abîmée.

Ces contrôles rapides demeurent cependant très utiles lorsque des tolérances utilisent le principe du *maximum de matière*. Habituellement, un calibre à limites est conçu de façon spécifique; il ne convient donc que pour une dimension nominale et une étendue de tolérance donnée. Une production variée nécessite alors d'avoir recours à et de stocker un grand nombre de calibres, chacun étant spécifique. Les calibres à limites ne sont pas des appareils mesureurs.

III.3.1. Pour alésages

Tampon lisse

Le tampon est un vérificateur constitué par un ou deux cylindres en acier trempé a surface parfaitement lisse, montés sur les extrémités d'une poignée sur laquelle est marquée la cote nominale suivie des symboles de tolérance.

Le contrôle d'une cote intérieure exige :

- un vérificateur entre pour affirmer que la cote n'est pas trop faible ; c'est le vérificateur mini,
- un vérificateur n'entre pas pour affirmer que la cote n'est pas trop grande ; c'est le vérificateur maxi.

Si les deux conditions sont remplies, la pièce est acceptable. La pièce a donc bien une cote réelle comprise entre les cotes limites.



III.3.2. Pour arbres

Bague lisse

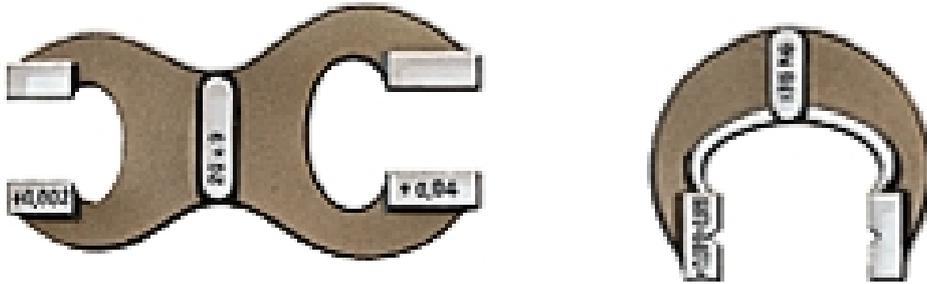
Bague lisse cylindrique de $3 \text{ mm} \leq D \leq 150 \text{ mm}$, mesure sur 2 ou 3 diamètres - Par comparaison mécanique



Calibres mâchoires

Chaque vérificateur est constitué par deux mâchoires gravés en son milieu la cote nominale et les symboles de tolérance sont gravés au milieu du poigner.

Pour l'emploi de ces vérificateurs, observer les mêmes règles que pour l'emploi des tampons lisses.



Calibre à mâchoires

III.3.3. Pour filetages

Tampon fileté

Tampon fileté cylindrique simple ou double, $\alpha = 55$ ou 60° , de $3 \text{ mm} \leq D \leq 100 \text{ mm}$, pas de 0,5 à 5 mm, mesure sur 1 diamètre.



Bague fileté

Bague fileté cylindrique, $\alpha = 55^\circ$ ou 60° , de $4 \text{ mm} \leq D \leq 125 \text{ mm}$, pas de 0,5 à 6 mm, mesure sur 1 diamètre - Par comparaison mécanique.



III.3.4. Pour angles

Calibres

Bague-calibre conique pour contrôler les petites portées coniques



Cône-calibre pour contrôles d'angles intérieurs

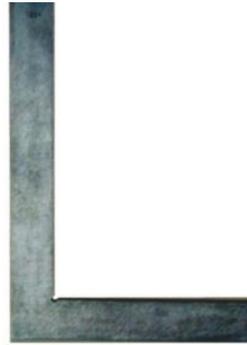


Equerres

Les équerres servent au traçage et à la vérification des pièces. Les types les plus employés pour ce genre de travaux sont l'équerre à chapeau, l'équerre simple combinée et équerre double onglet.



Equerre à chapeau d'atelier à 90°

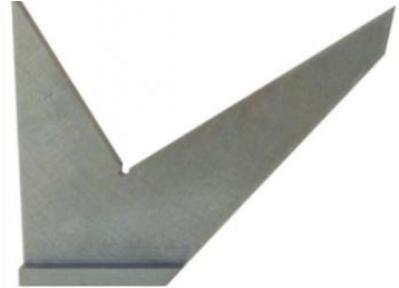


Equerre simple d'atelier

Equerre à angle aigu



Equerre à angle 60°



Equerre double onglet

III.3.5. Instruments de mesure par jaugeage

Vérificateur à dimension fixe (Contrôle par calibres à limites)

Ces contrôles s'avèrent utiles pour une vérification rapide. Cependant, ils fournissent peu ou pas d'informations quant à la nature des erreurs de fabrication présentes. Il est donc improbable que l'on puisse en tirer un diagnostic quant aux causes de ces erreurs de fabrication.

Jauge d'épaisseur

Instrument de mesure simple permettant de mesurer, ou plutôt d'estimer, le jeu ou l'épaisseur.



Jauge d'épaisseurs des fluides



Jauge d'épaisseurs

III.3.6. Les règles

Le régle : Ruban flexible et souple d'acier. Précision : 0,5 mm

Les règles : Barreau rigide le plus souvent métallique. Précision : 0,5 mm



Règle graduée double face



Règle digital



Règle inox avec dispositif de blocage en acier trempé



Règle à patin

III.4. OPERATIONS ET VERIFICATIONS PREALABLES A LA MESURE

III.4.1. Vérifier l'état de l'instrument

Tout instrument doit avoir une fiche de vie sur laquelle sont consignés les événements importants susceptibles d'affecter sa performance comme un *ajustage*, un *calibrage* ou un *étalonnage*. Consulter la fiche de vie d'un instrument avant de l'utiliser.

Ajustage

Opération destinée à amener un appareil mesureur à une justesse convenable.

Calibrage (d'un appareil mesureur)

Positionnement matériel des repères d'un appareil de mesure en fonction des valeurs correspondantes de la grandeur mesurée.

Étalonnage

Ensemble des opérations établissant, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs indiquées par un appareil mesureur ou les valeurs représentées par une mesure matérialisée, et les valeurs connues correspondantes d'une grandeur mesurée.

Le résultat de l'étalonnage est consigné dans un document (rapport d'étalonnage). Il est exprimé par un facteur, une série de facteurs, une courbe, un tableau,....

Régler le zéro

La plupart des instruments permettent de régler l'indication à zéro pour une grandeur à mesurer nulle. Sinon, il est approprié de modifier les mesures algébriquement pour compenser cet effet.

III.4.2. Vérification des erreurs systématiques

Il est prudent d'effectuer quelques mesurages sur des étalons de valeurs voisines de celles qui feront l'objet de nos mesures, pour s'assurer du bon fonctionnement de l'appareil et de la bonne utilisation

que nous en faisons. En consignnant les écarts calculés, nous disposerons d'une partie de l'information nécessaire à l'évaluation (ou la correction) des erreurs systématiques de mesure.

III.4.3. Procédure de contrôle

Il n'est pas très rentable de passer 1 heure sur une pièce pour la jeter parce que la dernière cote est non-conforme. On cherchera donc à contrôler les cotes sensibles en premier. Lorsque le métrologue reçoit une nouvelle pièce avec son plan, il repèrera toutes les spécifications qui le concernent. On peut séparer les spécifications en 2 types :

Eléments géométriques isolés :

- spécifications de forme,
- spécifications dimensionnelles : -diamètre, -angle. -distance entre 2 faces planes parallèles.

Eléments géométriques associés :

- spécification de position, - spécification d'orientation, - spécification de battement. - distance entre des surfaces non planes ou parallèles.

Grâce à des critères d'ordonnement, on choisira l'ordre des contrôles. Les critères principaux sont : Précision des tolérances (liée à la notion de risques de rebuts), Qualité géométrique des surfaces prises comme références (vérifier la forme avant de les utiliser comme références), Antériorité des spécifications (si la connaissance d'une spécification est nécessaire à la vérification d'une autre spécification, cas des spécification associées), Groupement métrologique (par type de vérification, par type de matériel métrologique, pour des problèmes d'accessibilité ...), Coût minimum : repousser les vérifications onéreuses à la fin si elle ne sont pas critiques. L'ordonnement retenu doit privilégier le critère précision et être un compromis de tous les autres critères.

De cette réflexion, on éditera une gamme de mesure. La gamme de mesure reprend l'ordonnement des mesures et propose les méthodes de mesures associées. Le niveau de précision de la gamme dépend de la compétence de l'opérateur.

Fréquence des mesures. Le contrôle à 100 % sera effectué si la réglementation l'impose (pièces de sécurité, domaine sensible). Le contrôle par échantillonnage est moins coûteux mais il ne s'applique qu'aux productions de grandes séries.

III.5. TRAITEMENT STATISTIQUE DES MESURES

Les erreurs entraînent une dispersion des résultats lors de mesures répétées. Leur traitement statistique permet :

- de connaître la valeur la plus probable de la grandeur mesurée,
- de fixer les limites de l'incertitude.

Lorsque la mesure d'une même grandeur X a été répété n fois, donnant les résultats : $x_1, x_2... x_n$, la **valeur moyenne** est définie par :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Une indication de la dispersion de ces résultats est donnée par l'écart-type :

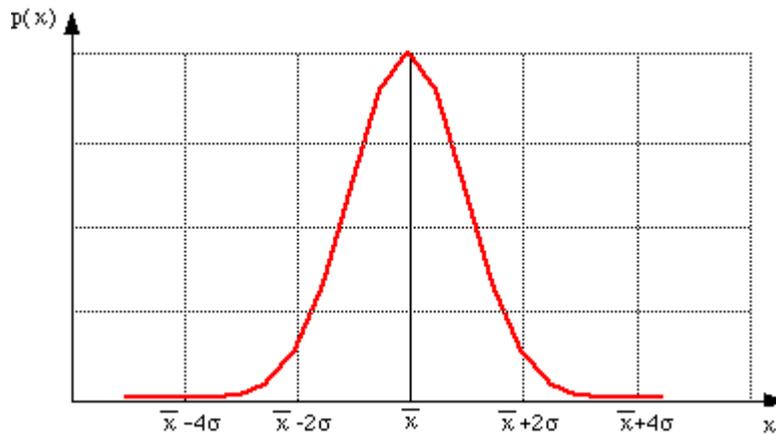
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Lorsque les erreurs accidentelles affectant les différentes mesures sont indépendantes, la probabilité d'apparition des différents résultats satisfait habituellement à la loi normale dite loi de Gauss :

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right\}$$

La valeur la plus probable est la valeur moyenne des mesures. $x = \bar{x}$

En général on prend une incertitude égale à 3 fois l'écart-type. $dx = 3\sigma$



III.5.1. Construction d'un histogramme

a-Collecte des données

La première phase est la collecte des données en cours de fabrication, il faut que le nombre de valeurs relevées soit suffisant. Plus l'on dispose d'un nombre élevé de valeurs, plus l'interprétation sera aisée.

Exemple : Soit un échantillon d effectif $N=50$ pièces prélevées au hasard dans une famille de 300 pièces. Les valeurs X des longueurs relevées sont égales à la valeur mesurée moins la valeur de référence du système de mesure ; $x=20,110 - 20,00 = 110 \mu\text{m}$

Valeurs de l'échantillon									
110	115	75	70	60	155	80	90	100	85
55	135	25	120	100	80	100	75	80	100
50	95	40	70	35	85	60	130	85	90
90	60	85	125	80	100	75	70	95	65
105	130	125	60	90	45	35	75	115	50

b-Nombre de classes k

La première opération est de déterminer le nombre de classes de l'histogramme. Généralement, dans le cadre d'une analyse de ce type, on utilise des classes de largeur identique.

Le nombre de classes dépend du nombre de valeurs N dont on dispose.

Le nombre de classes K peut être déterminé par la formule suivante:

$$K = 1 + \frac{10 \log(N)}{3}$$

ou plus simplement: $K = \sqrt{N}$

AN ; $k = \sqrt{50} = 7,07$ soit **7 classes**.

Cependant, l'histogramme étant souvent aussi un outil visuel, il est possible de faire varier le nombre de classes. Ceci permet de voir l'histogramme avec un nombre différent de classes et ainsi de trouver le meilleur compromis qui facilitera l'interprétation. L'utilisation d'un logiciel dédié ou plus simplement d'un tableur facilite cette opération.

c-Intervalles de classe (étendue des classes)

L'amplitude w de l'histogramme est

$w =$ valeur maximale - valeur minimale

L'amplitude h théorique de chaque

classe est alors: $h = \frac{w}{k}$

Il convient généralement d'arrondir cette valeur à un multiple de résolution de l'instrument de mesure (arrondi à l'excès).

AN : $h = (155 - 25)/7$ soit **$h = 20$**

Num de classe	Limites de classe	Centre de classe	Effectifs de classe	Fréquences	
	$L_i \leq x < L_s$			relative	cumulée
1	$15 \leq x < 35$	25	1	0,02	0,02
2	$35 \leq x < 55$	45	6	0,12	0,14
3	$55 \leq x < 75$	65	9	0,18	0,32
4	$75 \leq x < 95$	85	16	0,32	0,64
5	$95 \leq x < 115$	105	9	0,18	0,82
6	$115 \leq x < 135$	125	7	0,14	0,96
7	$135 \leq x < 155$	145	2	0,04	1

d-Limite inférieure de classe L_i

L_i = valeur minimale $- 0,5 h$

AN : $L_i = 25 - 0,5 \cdot 20$ soit $L_i = 15$

e-Limite supérieure de classe L_s

L_s = valeur maximale $+ 0,5 h$

AN : $L_s = 25 + 0,5 \cdot 20$ soit $L_s = 35$

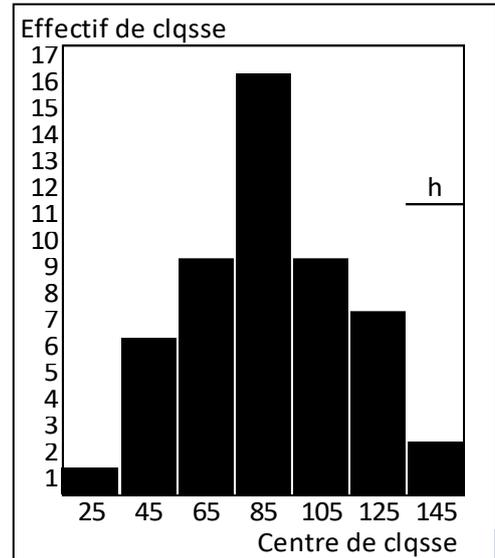
f-Centre de classe C_c

$C_c = (\text{valeur maximale} - \text{valeur minimale})/2$

AN : $C_c = (15 + 35) / 2$ soit $C_c = 25$

g- construction de l'histogramme

L'histogramme est une représentation graphique de la distribution des valeurs (exp. Longueurs regroupées par classe, sa forme renseigne sur la normalité de l'échantillon)

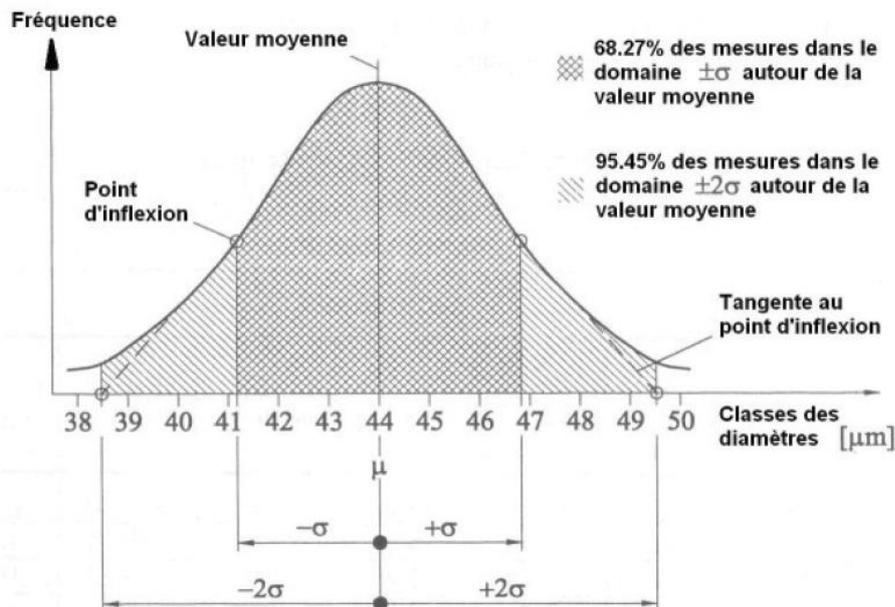


L'histogramme, montre une distribution très proche de la loi normale de Laplace-Gauss.

d- Intervalle de confiance

En statistiques lorsqu'on cherche à estimer la valeur d'un paramètre, on parle **d'intervalle ou niveau de confiance** lorsque l'on donne un intervalle **qui contient**, avec un certain degré de confiance, **la valeur à estimer**. Le niveau de confiance est en principe exprimé sous la forme d'une probabilité. **Plus l'intervalle de confiance est de taille petite, plus l'incertitude sur la valeur estimée est petite.**

Un niveau de confiance de 95.45% signifie qu'une mesure va se trouver dans le domaine de deux écarts-typ de part et d'autre de la valeur moyenne avec une probabilité de 95.45%.



Dans le cadre de la technique de mesure industrielle, on travaille la plupart du temps avec un niveau de confiance de 95% respectivement avec le domaine de confiance $\pm 1.96 \sigma$.

IV. TOLERANCES DIMENSIONNELLES ET AJUSTEMENTS

IV.1. CONTROLE DIMENSIONNEL ET L'INTERCHANGEABILITE

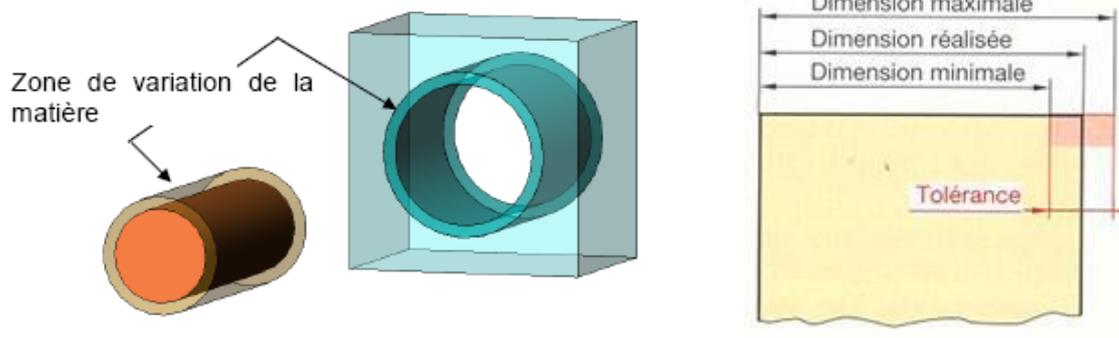
IV.1.1. Le contrôle dimensionnel

Mesurer une grandeur c'est la comparer à une autre de même espèce prise comme unité, une mesure n'est jamais exacte, elle est toujours établit par comparaison avec une autre dite étalon de mesure.

Le contrôle dimensionnel s'applique en particulier en construction mécanique et le mesurage se rapporte généralement à celui des dimensions linéaires (le mètre et ses sous multiples) et angulaires (le degré et ses sous multiples) des pièces mécaniques.

L'impossibilité de précision des procédés d'usinage fait qu'une pièce ne peut être réalisée de façon rigoureusement conforme aux dimensions fixées au préalable. Le contrôle nous permet de s'assurer que les dimensions des valeurs réelles sont comprises entre deux limites dites : la cote maximum et la cote minimum.

Donc il faut, par un contrôle, s'assurer que la cote réelle se situe entre les deux limites définies par la tolérance.



Unités de longueur :

L'utilisation du millimètre (mm) et du micron (μ) pour l'écriture des cotes permet de résoudre tous les problèmes usuels en utilisant toujours des nombres entiers.

Exemples :

$$30,015 \text{ mm} = 30 \text{ mm} + 15 \mu \text{ s'écrit : } 30^{+15}$$

$$17,965 \text{ mm} = 18 \text{ mm} - 35 \mu \text{ s'écrit : } 18^{-35}$$

IV.1.2. L'interchangeabilité

L'interchangeabilité est la possibilité de prendre au hasard dans un lot de pièces semblables, une pièce quelconque, sans avoir besoin d'aucun travail d'ajustage pour assurer son montage et son bon fonctionnement dans un assemblage donné et dans les conditions de fonctionnement exigées (avec les conditions de jeu et de serrage voulu).

L'exemple classique d'un assemblage est celui d'un arbre avec alésage (fig.), le terme général arbre désigne tous les contenus (tenons, coulisseaux, clavettes, ...) et le terme général alésage désigne tous les contenants (mortaises, glissières, rainures etc.)

Pour réaliser un tel assemblage, la cote $\varnothing 40$ indiquée sur le dessin est insuffisante, car elle ne nous renseigne pas sur la façon dont on doit effectuer l'assemblage (avec jeu, juste ou avec serrage), même si le dessin comporte l'une des indications suivantes : glissant, tournant ou bloqué. Il faudra pour réaliser l'assemblage, faire des retouches afin d'obtenir l'ajustement désiré, mais ceci n'est valable que dans une production unitaire

Par contre si l'on a toute une série d'assemblages identiques à réaliser (par différents ouvriers et

différentes machines), il est impossible de contrôler chaque arbre et chaque alésage. Pour arriver au résultat désiré, il a été nécessaire de donner à l'ouvrier une marge d'usinage qu'on appelle tolérance de fabrication et dans laquelle on a du tenir compte de la cote de toutes les pièces afin d'obtenir l'ajustement désiré.

Donc assurer l'interchangeabilité des éléments d'un assemblage suppose qu'on les produit en série et qu'on les accouplera sans les choisir, c'est à dire n'importe quelle pièce de l'une des deux séries, réalise l'ajustement désiré avec l'une quelconque de l'autre série. Donc une pièce sera jugée bonne si sa cote réelle est comprise entre une cote limite supérieure et une cote limite inférieure. La différence entre ces deux cotes constituant la tolérance.

Par exemple, pour l'arbre, la cote peut être comprise entre 39,8 et 40,1 mm pour être acceptable, la tolérance laissée au fabricant est de :

$$40,1 - 39,8 = 0,3 \text{ mm} = 300 \mu$$

Dans l'industrie, on distingue deux types d'interchangeabilité :

- L'interchangeabilité complète.
- L'interchangeabilité limitée

a. L'interchangeabilité complète

C'est elle qui assure le montage d'une machine sans choisir ou sélectionner les pièces à assembler et sans leur retouche (réusinage), elle est préférée, mais dans ce cas les pièces coûtent plus chères que dans l'interchangeabilité limitée.

b. L'interchangeabilité limitée

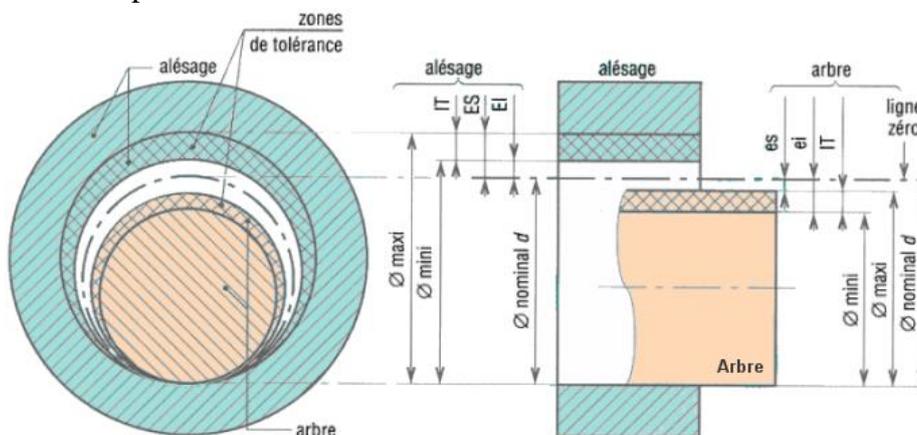
Elle consiste à choisir parmi le lot de pièces usinées celles qui conviennent au montage de l'assemblage. Autrement dit, les pièces qui ne répondent pas aux exigences sont réusinées de nouveau.

IV.2. TOLERANCES ET AJUSTEMENTS

IV.2.1. Notions de dimensions et cotes tolérancées

Compte tenu du processus de fabrication choisi et des machines utilisées, une cote réelle mesurant l'une des dimensions d'un objet ne peut être exactement la même que celle indiquée sur le dessin de définition. Il est impossible de fabriquer une série d'objets identiques ayant toujours les mêmes dimensions.

Une cote imposée sera plus facile à réaliser si celle ci varie entre deux valeurs limites:



- une cote maximale **C_{max}**
- une cote minimale **C_{mini}**

La figure représente l'exemple d'un assemblage cylindrique d'un arbre avec alésage dit ajustement

en indiquant toutes les cotes possibles.

IV.2.2. Types de cotes

On distingue 3 types de cotes.

a. Cote nominale : C'est la cote souhaitée ou celle de calcul par rapport à laquelle sont définies les cotes limites. Elle doit être la même pour l'arbre et l'alésage.

b. Cotes limites

Dans la pratique il est quasiment impossible d'usiner une pièce exactement à sa cote nominale par suite des incertitudes dans la fabrication (régime de coupe, incertitudes,...), c'est pourquoi on fixe les cotes limites admissibles pour une précision donnée.

Ce sont les deux cotes extrêmes acceptables dites cotes maxi et cote mini, entre lesquelles doit se trouver la cote effective (ou réelle) pour que la pièce soit relativement précise et interchangeable (remplaçable), Cette précision ou marge d'usinage est appelée tolérance de fabrication.

Supposons un cas de figure où la valeur nominale étant de 40 mm et les valeurs limites sont les suivantes :

- Cote maxi de l'arbre $C_{max} = 40,10$
- Cote mini de l'arbre $C_{min} = 39,80$
- Cote maxi de l'alésage : $C_{max} = 40,20$
- Cote mini de l'alésage : $C_{min} = 40,00$

c. Cote effective ou cote réelle

C'est la cote d'exécution ou la cote réelle (de la pièce mesurée avec précision tolérable c'est-à-dire telle qu'elle est réalisée. Dans ce cas la cote effective mesurée (C_e) doit être comprise entre les deux valeurs extrêmes C_{max} et C_{min} .

$$C_{min} \leq C_e \leq C_{max}$$

IV.3. ECARTS D'UN ARBRE (ALESAGE)

L'écart est la différence algébrique entre les cotes effectives maxi, mini et la cote nominale. On distingue 3 types d'écarts :

IV.3.1. Ecart effectif

écart effectif = cote effective - cote nominale

$$ee = C_e - C_n$$

$$ee = 39,9 - 40 = - 0,1$$

IV.3.2. Ecart supérieur

écart supérieur = cote maxi - cote nominale

$$es = C_{max} - C_n$$

$$es = 40,1 - 40 = + 0,1$$

IV.3.3. Ecart inférieur

écart inférieur = cote mini - cote nominale

$$ei = C_{min} - C_n$$

$$ei = 39,8 - 40 = - 0,2$$

Les écarts sont indiqués sur le dessin en mm, tandis que sur les tableaux des tolérances ils sont

donnés en microns.

IV.4. INTERVALLE DE TOLERANCE

La différence entre les écarts supérieur et inférieur est la valeur la plus importante, appelée tolérance de fabrication ou intervalle de tolérance désignée par IT (it) ; elle est une valeur absolue.

Intervalle de tolérance

Intervalle de tolérance = Ecart supérieur – Ecart inférieur

Nous utilisons exactement les mêmes considérations d'un arbre pour les alésages sauf que les désignations en minuscule des arbres deviennent des majuscules pour les alésages.

Pour les arbres

$$it = es - ei$$

$$it = (C_{max} - C_n) - (C_{min} - C_n) = C_{max} - C_{min}$$

$$\text{Donc : } it - C_{max} - C_{min} = es - ei$$

Pour les alésages

$$IT = ES - EI = C_{max} - C_{min}$$

Cotes tolérancées

On distingue une cote tolérancée en indiquant le diamètre nominal et les deux écarts supérieur et inférieur de la façon suivante :

Exemples :

$$\text{Arbre } \varnothing 40_{-0,02}^{+0,01}$$

40 mm = diamètre nominal ; + 0,01 mm = es ; - 0,02 mm = ei

$$\text{Alésage } \varnothing 50_{-0,02}^{+0,02}$$

50 mm = diamètre nominal ; + 0,02 mm = ES ; - 0,02 mm = EI

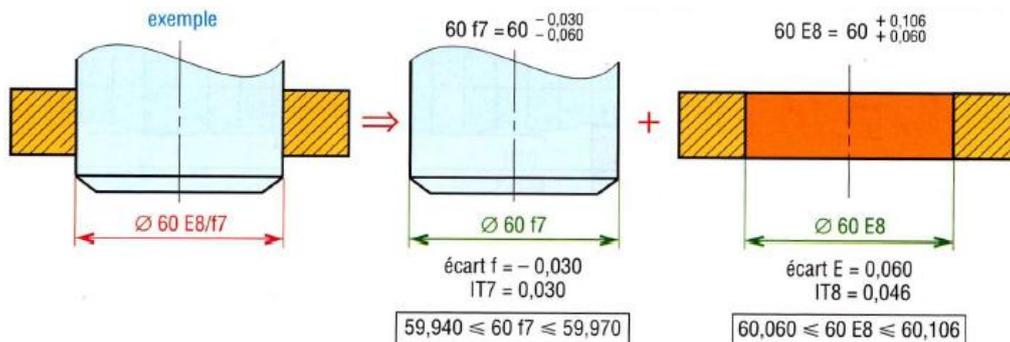
IV.5. AJUSTEMENTS

Un ajustement est l'assemblage de deux pièces de même cote nominale au moyen d'une liaison qui permet ou non le mouvement relatif de l'une par rapport à l'autre.

L'exemple le plus courant est celui de l'ajustement d'un arbre avec un alésage qui est l'exemple type d'un ajustement cylindrique (fig.).

Arbre + Alésage = Ajustement cylindrique

Pour qu'il y ait ajustement, il faut que l'une des pièces pénètre dans l'autre.



IT et it peuvent se situer soit dans la partie positive, soit dans la partie négative, soit à cheval par rapport à la ligne zéro.

IV.5. 1. Types d'ajustements :

Le type d'ajustement est déterminé par les positions relatives des zones de tolérance des pièces à assembler.

Ajustement avec jeu garanti

L'intervalle de tolérance de l'arbre (it) est toujours positif quelque soit sa position par rapport à la cote nominale. Pour cet ajustement toute la zone de tolérance se trouve au dessus de celle de l'alésage et la cote effective de l'alésage est toujours supérieure à celle de l'arbre, c'est pourquoi l'arbre pénètre librement et sans résistance dans l'alésage.

$$\text{Jeu maxi} = C_{\text{max}} (\text{alésage}) - C_{\text{min}} (\text{arbre}) = (C_n + ES) - (C_n + ei) = ES - ei$$

$$\text{Jeu mini} = C_{\text{min}} (\text{alésage}) - C_{\text{max}} (\text{arbre}) = (C_n + EI) - (C_n + es) = EI - es$$

$$\text{Jeu mini} \leq \text{Jeu réel} \leq \text{Jeu maxi}$$

$$TA = IT + it \text{ dans ce cas } TA = \text{Jeu maxi} - \text{Jeu mini}$$

Ajustement avec serrage garanti

Dans ce cas toute la zone de tolérance de l'alésage se trouve au dessous de celle de l'arbre. La cote réelle de l'alésage est inférieure à celle de l'arbre, c'est pourquoi pour effectuer un assemblage de ce type, il faut employer un procédé mécanique ou thermique ou une combinaison des deux.

Par exemple il faut presser l'arbre dans l'alésage à l'aide d'efforts mécaniques ou hydrauliques. On peut aussi chauffer la pièce femelle alors son diamètre grandit et l'arbre pénètre librement dans l'alésage. Après le refroidissement dans l'azote liquide on obtient l'ajustement désiré.

$$\text{Serrage maxi} = C_{\text{max}} (\text{arbre}) - C_{\text{min}} (\text{alésage}) = (C_n + es) - (C_n + EI) = es - EI$$

$$\text{Serrage min} = C_{\text{min}} (\text{arbre}) - C_{\text{max}} (\text{alésage}) = (C_n + ei) - (C_n + ES) = ei - ES$$

$$\text{Serrage min} \leq \text{Serrage réel} \leq \text{Serrage maxi}$$

$$TA = IT + it = (ES - EI) + (es - ei) = \text{Serrage maxi} - \text{Serrage min}$$

Ajustement incertain

Pour l'ajustement incertain, la zone de la tolérance de l'arbre couvre partiellement celle de l'alésage. La cote réelle de l'arbre peut être supérieure ou inférieure à celle de l'alésage. Il y a dans ce cas tantôt un jeu, tantôt un serrage, c'en pourquoi cet ajustement porte le nom d'ajustement incertain.

$$\text{Serrage maxi} = es - EI$$

$$\text{Jeu maxi} = ES - ei$$

$$TA = IT + it = (ES - EI) + (es - ei) = (ES - ei) + (es - EI) = \text{Serrage maxi} - \text{Jeu maxi}$$

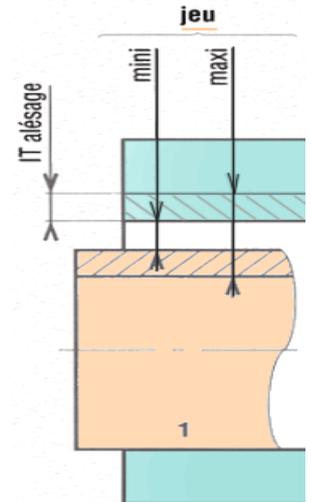
Jeu maxi

Exemple:

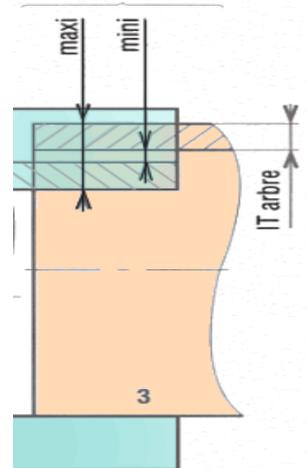
Arbre $\varnothing 60_{-0,01}^{+0}$, Alésage $\varnothing 60_{-0,03}^{+0,05}$

$$\text{Serrage maxi} = es - EI = 0,03 - 0 = 0,03 \text{ mm}$$

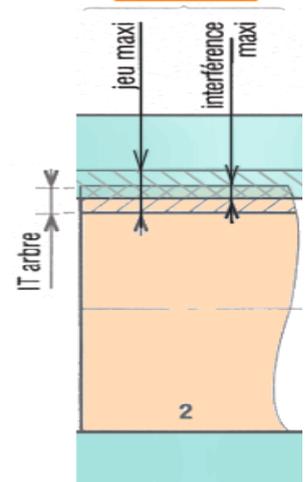
$$\text{Jeu maxi} = ES - ei = 0,05 - (-0,01) = 0,06 \text{ mm}$$



interférence serrage



jeu incertain



$$TA = \text{Serrage maxi} - \text{Jeu maxi} = 0,03 - 0,06 = -0,03 \text{ mm}$$

IV.5.2. Qualité d'ajustement

Pour définir ou connaître la précision d'une pièce, le système ISO a établi 18 qualités. Chaque qualité est désignée par un nombre dont le numéro de qualité le plus élevé correspond à la tolérance la plus grande donc à la précision la plus faible.

Exemple :

- la qualité 5 donne $IT = 0,011 \text{ mm}$
- la qualité 8 donne $IT = 0,025 \text{ mm}$
- la qualité 11 donne $IT = 0,160 \text{ mm}$

La qualité 5 requiert la tolérance de fabrication la plus faible donc c'est elle qui donne le plus de précision des cotes.

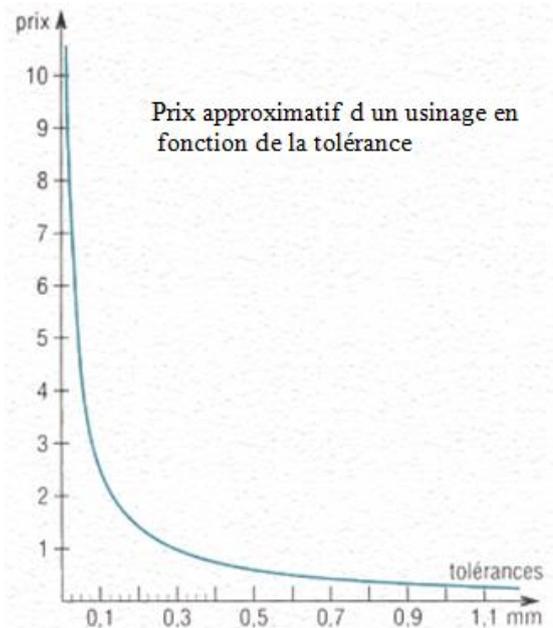
La qualité définit la valeur de la tolérance donc la méthode de fabrication appropriée (usinage, régime de coupe, outils de coupe et instruments de mesure adaptés). En effet tout ceci influe sur le prix de revient qui augmente lorsqu'on réduit la tolérance. Les couts augmentent avec le degré de précision exigé.

Les qualités les plus courantes sont :

- de 4 à 11 pour les arbres
- de 5 à 12 pour les alésages
- de 12 à 16 pour les cotes isolées et non ajustées.

En général les qualités de tolérance sont adoptées comme suit

- 0, 1 : pour les cales étalons de grandes précision.
- 2, 3, 4 : pour les calibres et instruments de mesure.
- 5, 6, 7 : pour la mécanique précise (aviation).
- 8, 9, 10, 11 : pour la mécanique courante.



01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Appareils de mesure						Qualité mécanique courante				Mécanique grossière pour des liaisons sans précision ou sans mouvements ou pour des surfaces non fonctionnelles.							
Pour des fonctions mécaniques très spécifiques. Matériels de laboratoire ou médicaux, optique de précision.				Mécanique très précise				Mécanique peu précise, mouvements lents ou de faible amplitude ou peu fréquents.									

Le tableau suivant donne à titre indicatif les valeurs de la qualité. La précision doit être réalisée à bon connaissance des conditions de fonctionnement et pour la déterminer, il faut faire des calculs, et, pour la grande série, des essais sur des prototypes.

IV.5.3. Choix d'un ajustement

En mécanique, le choix dépend de la liaison à réaliser et de la précision exigée pour le guidage. Les spécifications doivent être suffisantes mais non surabondantes. Une trop grande précision est inutile et chère. Y a t il jeu ou serrage ? Les pièces sont-elles mobiles ou immobiles ? S'agit-il d'un positionnement ou d'un centrage ? La liaison doit-elle transmettre des efforts ? ...Pour les applications usuelles l'utilisation de valeurs ci dessous est suffisante. Le fabricant et le métrologue

utilisent un tableau permettant de faire la correspondance entre l'ajustement normalisé et la tolérance chiffrée.

Principaux ajustements			Arbres*	H 6	H 7	H 8	H 9	H 11
Pièces mobiles l'une par rapport à l'autre	Pièces dont le fonctionnement nécessite un grand jeu (dilatation, mauvais alignement, portées très longues, etc.).		c				9	11
			d				9	11
	Cas ordinaire des pièces tournant ou glissant dans une bague ou palier (bon graissage assuré).		e		7	8	9	
			f	6	6-7	7		
Pièces avec guidage précis pour mouvements de faible amplitude.		g	5	6				
Pièces immobiles l'une par rapport à l'autre	Démontage et remontage possible sans détérioration des pièces	L'assemblage ne peut pas transmettre d'effort	Mise en place possible à la main	h	5	6	7	8
			Mise en place au maillet	js	5	6		
		L'assemblage peut transmettre des efforts	Mise en place à la presse	k	5			
			Mise en place à la presse ou par dilatation (vérifier que les contraintes imposées au métal ne dépassent pas la limite élastique)	m		6		
	Démontage impossible sans détérioration des pièces	L'assemblage peut transmettre des efforts	Mise en place à la presse	p		6		
			Mise en place à la presse ou par dilatation (vérifier que les contraintes imposées au métal ne dépassent pas la limite élastique)	s			7	
				u			7	
				x			7	

Qualités usuelles indicatives des principaux procédés d'usinage																
IT (qualité)	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
oxycoupage																
sciage																
rabotage																
perçage																
fraisage																
perçage + alésoir																
alésage																
brochage																
tournage																
rectification																
rodage																
superfinition																

NB : Le chiffre représente l'intervalle de tolérance (la classe de précision de l'ajustement). En principe l'arbre et l'alésage doivent être de la même qualité : $\varnothing 30$ h 7 - f 7. Toutefois 1 point de moins peut être accepté pour l'arbre car il est plus facile de faire un arbre précis qu'un alésage : $\varnothing 30$ h 7 - f 6.

Table de Choix des Ajustements

Ajustements Usuels (Système de l'alésage H)													
Type	arbre	Alésages						Observations					
		H6	H7	H8	H9	H10	H11						
Pièces mobiles	jeu élevé	c11								Cas usuels de longues portées, mauvais alignement, dilatations...			
		c10											
		c9											
		d10											
		d9											
		d8											
	jeu moyen	e9								Cas usuels pour guidages tournants ou glissant avec jeu (bon graissage assuré)			
		e8											
		e7											
		f8											
	jeu faible	f7											
		f6											
jeu incertain	g6								pour guidages précis				
	g5												
Pièces immobiles	ajusté	h9							assemblage possible à la main		Pour centrages et positionnement ne peut pas transmettre des efforts	pas de détérioration des pièces au démontage	
		h7											
		h6											
		h5											
	très ajusté	js7							assemblage possible au "maillet" (Presse recommandée)				
		js6											
		js5											
	peu serré	k6							assemblage à la presse				
		k5											
		m7											
		m6											
	serré (interférence)	n6							assemblage à la presse lourde ou par dilatation (fretage)	Pour transmission des efforts			détérioration des pièces au démontage
		p6											
		r6											
		s7											
		s6											
		t6											
	serré fort	u6											
x7													

cas les plus utilisés
 cas les plus utilisés (à connaître)

Arbres	Jusqu'à 3 inclus	3 à 6 inclus	6 à 10	10 à 18	18 à 30	30 à 50	50 à 80	80 à 120	120 à 180	180 à 250	250 à 315	315 à 400	400 à 500
a 11	- 270 - 330	- 270 - 345	- 280 - 370	- 290 - 400	- 300 - 430	- 320 - 470	- 360 - 530	- 410 - 600	- 580 - 710	- 820 - 950	- 1 050 - 1 240	- 1 350 - 1 560	- 1 650 - 1 900
c 11	- 60 - 120	- 70 - 145	- 80 - 170	- 95 - 205	- 110 - 240	- 130 - 280	- 150 - 330	- 180 - 390	- 230 - 450	- 280 - 530	- 330 - 620	- 400 - 720	- 480 - 840
d 9	- 20 - 45	- 30 - 60	- 40 - 75	- 50 - 93	- 65 - 117	- 80 - 142	- 100 - 174	- 120 - 207	- 145 - 245	- 170 - 285	- 190 - 320	- 210 - 350	- 230 - 385
d 10	- 20 - 60	- 30 - 78	- 40 - 98	- 50 - 120	- 65 - 149	- 80 - 180	- 100 - 220	- 120 - 250	- 145 - 305	- 170 - 355	- 190 - 400	- 210 - 440	- 230 - 480
d 11	- 20 - 80	- 30 - 105	- 40 - 130	- 50 - 160	- 65 - 195	- 80 - 240	- 100 - 290	- 120 - 340	- 145 - 395	- 170 - 460	- 190 - 510	- 210 - 570	- 230 - 630
e 7	- 14 - 24	- 20 - 32	- 25 - 40	- 32 - 50	- 40 - 61	- 50 - 75	- 60 - 90	- 72 - 107	- 85 - 125	- 100 - 146	- 110 - 162	- 125 - 182	- 135 - 198
e 8	- 14 - 28	- 20 - 38	- 25 - 47	- 32 - 59	- 40 - 73	- 50 - 89	- 60 - 106	- 72 - 126	- 85 - 148	- 100 - 172	- 110 - 191	- 125 - 214	- 135 - 232
e 9	- 14 - 39	- 20 - 50	- 25 - 61	- 32 - 75	- 40 - 92	- 50 - 112	- 60 - 134	- 72 - 159	- 85 - 185	- 100 - 215	- 110 - 240	- 125 - 265	- 135 - 290
f 6	- 6 - 12	- 10 - 18	- 13 - 22	- 16 - 27	- 20 - 33	- 25 - 41	- 30 - 49	- 36 - 58	- 43 - 68	- 50 - 79	- 56 - 88	- 62 - 98	- 68 - 108
f 7	- 6 - 16	- 10 - 22	- 13 - 28	- 16 - 34	- 20 - 41	- 25 - 50	- 30 - 60	- 36 - 71	- 43 - 83	- 50 - 96	- 56 - 106	- 62 - 119	- 68 - 131
f 8	- 6 - 20	- 10 - 28	- 13 - 35	- 16 - 43	- 20 - 53	- 25 - 64	- 30 - 76	- 36 - 90	- 43 - 106	- 50 - 122	- 56 - 137	- 62 - 151	- 68 - 165
g 5	- 2 - 6	- 4 - 9	- 5 - 11	- 6 - 14	- 7 - 16	- 9 - 20	- 10 - 23	- 12 - 27	- 14 - 32	- 15 - 35	- 17 - 40	- 18 - 43	- 20 - 47
g 6	- 2 - 8	- 4 - 12	- 5 - 14	- 6 - 17	- 7 - 20	- 9 - 25	- 10 - 29	- 12 - 34	- 14 - 39	- 15 - 44	- 17 - 49	- 18 - 54	- 20 - 60
h 5	0 - 4	0 - 5	0 - 6	0 - 8	0 - 9	0 - 11	0 - 13	0 - 15	0 - 18	0 - 20	0 - 23	0 - 25	0 - 27
h 6	0 - 6	0 - 8	0 - 9	0 - 11	0 - 13	0 - 16	0 - 19	0 - 22	0 - 25	0 - 29	0 - 32	0 - 36	0 - 40
h 7	0 - 10	0 - 12	0 - 15	0 - 18	0 - 21	0 - 25	0 - 30	0 - 35	0 - 40	0 - 46	0 - 52	0 - 57	0 - 63
h 8	0 - 14	0 - 18	0 - 22	0 - 27	0 - 33	0 - 39	0 - 46	0 - 54	0 - 63	0 - 72	0 - 81	0 - 89	0 - 97
h 9	0 - 25	0 - 30	0 - 36	0 - 43	0 - 52	0 - 62	0 - 74	0 - 87	0 - 100	0 - 115	0 - 130	0 - 140	0 - 155
h 10	0 - 40	0 - 48	0 - 58	0 - 70	0 - 84	0 - 100	0 - 120	0 - 140	0 - 160	0 - 185	0 - 210	0 - 230	0 - 250
h 11	0 - 60	0 - 75	0 - 90	0 - 110	0 - 130	0 - 160	0 - 190	0 - 220	0 - 250	0 - 290	0 - 320	0 - 360	0 - 400
h 13	0 - 140	0 - 180	0 - 220	0 - 270	0 - 330	0 - 390	0 - 460	0 - 540	0 - 630	0 - 720	0 - 810	0 - 890	0 - 970
j 6	+ 4 - 2	+ 6 - 2	+ 7 - 2	+ 8 - 3	+ 9 - 4	+ 11 - 5	+ 12 - 7	+ 13 - 9	+ 14 - 11	+ 16 - 13	+ 16 - 16	+ 18 - 18	+ 20 - 20
js 5	± 2	± 2,5	± 3	± 4	± 4,5	± 5,5	± 6,5	± 7,5	± 9	± 10	± 11,5	± 12,5	± 13,5
js 6	± 3	± 4	± 4,5	± 5,5	± 6,5	± 8	± 9,5	± 11	± 12,5	± 14,5	± 16	± 18	± 20
js 9	± 12	± 15	± 18	± 21	± 26	± 31	± 37	± 43	± 50	± 57	± 65	± 70	± 77
js 11	± 30	± 37	± 45	± 55	± 65	± 80	± 95	± 110	± 125	± 145	± 160	± 180	± 200
k 5	+ 4 0	+ 6 + 1	+ 7 + 1	+ 9 + 1	+ 11 + 2	+ 13 + 2	+ 15 + 2	+ 18 + 3	+ 21 + 3	+ 24 + 4	+ 27 + 4	+ 29 + 4	+ 32 + 5
k 6	+ 6 0	+ 9 + 1	+ 10 + 1	+ 12 + 1	+ 15 + 2	+ 18 + 2	+ 21 + 2	+ 25 + 3	+ 28 + 3	+ 33 + 4	+ 36 + 4	+ 40 + 4	+ 45 + 5
m 5	+ 6 + 2	+ 9 + 4	+ 12 + 6	+ 15 + 7	+ 17 + 8	+ 20 + 9	+ 24 + 11	+ 28 + 13	+ 33 + 15	+ 37 + 17	+ 43 + 20	+ 46 + 21	+ 50 + 23
m 6	+ 8 + 2	+ 12 + 4	+ 15 + 6	+ 18 + 7	+ 21 + 8	+ 25 + 9	+ 30 + 11	+ 35 + 13	+ 40 + 15	+ 46 + 17	+ 52 + 20	+ 57 + 21	+ 63 + 23
n 6	+ 10 + 4	+ 16 + 8	+ 19 + 10	+ 23 + 12	+ 28 + 15	+ 33 + 17	+ 39 + 20	+ 45 + 23	+ 52 + 27	+ 60 + 31	+ 66 + 34	+ 73 + 37	+ 80 + 40
p 6	+ 12 + 6	+ 20 + 12	+ 24 + 15	+ 29 + 18	+ 35 + 22	+ 42 + 26	+ 51 + 32	+ 59 + 37	+ 68 + 43	+ 79 + 50	+ 88 + 56	+ 98 + 62	+ 108 + 68

Alésages	Jusqu'à 3 inclus	3 à 6 inclus	6 à 10	10 à 18	18 à 30	30 à 50	50 à 80	80 à 120	120 à 180	180 à 250	250 à 315	315 à 400	400 à 500
D 10	+ 60 + 20	+ 78 + 30	+ 98 + 40	+ 120 + 50	+ 149 + 65	+ 180 + 80	+ 220 + 100	+ 260 + 120	+ 305 + 145	+ 355 + 170	+ 400 + 190	+ 440 + 210	+ 480 + 230
F 7	+ 16 + 6	+ 22 + 10	+ 28 + 13	+ 34 + 16	+ 41 + 20	+ 50 + 25	+ 60 + 30	+ 71 + 36	+ 83 + 43	+ 96 + 50	+ 108 + 56	+ 119 + 62	+ 121 + 68
G 6	+ 8 + 2	+ 12 + 4	+ 14 + 5	+ 17 + 6	+ 20 + 7	+ 25 + 9	+ 29 + 10	+ 34 + 12	+ 39 + 14	+ 44 + 15	+ 49 + 17	+ 54 + 18	+ 60 + 20
H 6	+ 6 0	+ 8 0	+ 9 0	+ 11 0	+ 13 0	+ 16 0	+ 19 0	+ 22 0	+ 25 0	+ 29 0	+ 32 0	+ 36 0	+ 40 0
H 7	+ 10 0	+ 12 0	+ 15 0	+ 18 0	+ 21 0	+ 25 0	+ 30 0	+ 35 0	+ 40 0	+ 46 0	+ 52 0	+ 57 0	+ 63 0
H 8	+ 14 0	+ 18 0	+ 22 0	+ 27 0	+ 33 0	+ 39 0	+ 46 0	+ 54 0	+ 63 0	+ 72 0	+ 81 0	+ 89 0	+ 97 0
H 9	+ 25 0	+ 30 0	+ 36 0	+ 43 0	+ 52 0	+ 62 0	+ 74 0	+ 87 0	+ 100 0	+ 115 0	+ 130 0	+ 140 0	+ 155 0
H 10	+ 40 0	+ 48 0	+ 58 0	+ 70 0	+ 84 0	+ 100 0	+ 120 0	+ 140 0	+ 160 0	+ 185 0	+ 210 0	+ 230 0	+ 250 0
H 11	+ 60 0	+ 75 0	+ 90 0	+ 110 0	+ 130 0	+ 160 0	+ 190 0	+ 210 0	+ 250 0	+ 290 0	+ 320 0	+ 360 0	+ 400 0
H 12	+ 100 0	+ 120 0	+ 150 0	+ 180 0	+ 210 0	+ 250 0	+ 300 0	+ 350 0	+ 400 0	+ 460 0	+ 520 0	+ 570 0	+ 630 0
H 13	+ 140 0	+ 180 0	+ 220 0	+ 270 0	+ 330 0	+ 390 0	+ 460 0	+ 540 0	+ 630 0	+ 720 0	+ 810 0	+ 890 0	+ 970 0
J 7	+ 4 - 6	+ 6 - 6	+ 8 - 7	+ 10 - 8	+ 12 - 9	+ 14 - 11	+ 18 - 12	+ 22 - 13	+ 26 - 14	+ 30 - 16	+ 36 - 16	+ 39 - 18	+ 43 - 20
K 6	0 - 6	+ 2 - 6	+ 2 - 7	+ 2 - 9	+ 2 - 11	+ 3 - 13	+ 4 - 15	+ 4 - 18	+ 4 - 21	+ 5 - 24	+ 5 - 27	+ 7 - 29	+ 8 - 32
K 7	0 - 10	+ 3 - 9	+ 5 - 10	+ 6 - 12	+ 6 - 15	+ 7 - 18	+ 9 - 21	+ 10 - 25	+ 12 - 28	+ 13 - 33	+ 16 - 36	+ 17 - 40	+ 18 - 45
M 7	- 2 - 12	0 - 12	0 - 15	0 - 18	0 - 21	0 - 25	0 - 30	0 - 35	0 - 40	0 - 46	0 - 52	0 - 57	0 - 63
N 7	- 4 - 14	- 4 - 16	- 4 - 19	- 5 - 23	- 7 - 28	- 8 - 33	- 9 - 39	- 10 - 45	- 12 - 52	- 14 - 60	- 14 - 66	- 16 - 73	- 17 - 80
N 9	- 4 - 29	0 - 30	0 - 36	0 - 43	0 - 52	0 - 62	0 - 74	0 - 87	0 - 100	0 - 115	0 - 130	0 - 140	0 - 155
P 6	- 6 - 12	- 9 - 17	- 12 - 21	- 15 - 26	- 18 - 31	- 21 - 37	- 26 - 45	- 30 - 52	- 36 - 61	- 41 - 70	- 47 - 79	- 51 - 87	- 55 - 95
P 7	- 6 - 16	- 8 - 20	- 9 - 24	- 11 - 29	- 14 - 35	- 17 - 42	- 21 - 51	- 24 - 59	- 28 - 68	- 33 - 79	- 36 - 88	- 41 - 98	- 45 - 108
P 9	- 9 - 31	- 12 - 42	- 15 - 51	- 18 - 61	- 22 - 74	- 26 - 88	- 32 - 106	- 37 - 124	- 43 - 143	- 50 - 165	- 56 - 186	- 62 - 202	- 68 - 223

IV.5.4. Indices de qualité :

On sait que les erreurs ou imprécisions de fabrication croissent avec l'augmentation de la dimension à usiner. C'est pourquoi la tolérance de fabrication augmente aussi avec la cote nominale. Donc la tolérance de fabrication dépend de la qualité et du diamètre à usiner.

La tolérance est égale au produit de la valeur de l'unité de tolérance pour la dimension nominale par un coefficient propre à chaque qualité appelé indice de qualité.

$$IT (it) = (0,45 \times D^{0,75} + 0,001 \times D) \times K \text{ [en microns]}$$

- D : diamètre nominal de la pièce à usiner en mm compris entre 1 et 500 mm.

- K : indice de qualité.

Les indices de qualité les plus couramment utilisés sont donnés dans ce tableau :

Qualité	5	6	7	8	9	10	11
Indice de qualité	7	10	16	25	40	64	100

Exemples :

1. Pour un alésage de diamètre 40 mm et de qualité 7 (K = 16)

$$it = (0,45 \times 40^{1/3} + 0,001 \times 40) \times 16 = 1,58 \times 16 = 25,28 \text{ microns}$$

Les tableaux donnent it = 25 microns.

2. Pour un alésage de diamètre 40 mm et de qualité 11 (K = 100)

$$it = (0,45 \times 40^{1/3} + 0,001 \times 40) \times 100 = 1,58 \times 100 = 158 \text{ microns}$$

Les tableaux donnent it = 160 microns

Pour les dimensions nominales au dessus de 500 mm, on préconise une autre formule:

$$IT (it) = (0,004 \times D + 2,1) \times K$$

Pour les diamètres de 1 à 500 mm, on a normalisé 120 cotes nominales. Afin de simplifier les tableaux de tolérances, le système ISO a établi 13 paliers de diamètres:

1 à 3, 3 à 6, 6 à 10, 10 à 15, ... ,315 à 400, 400 à 500

La limite supérieure est incluse alors que la limite inférieure est exclue. Ce qui veut dire que la cote 6 par exemple, il faut chercher la tolérance dans le palier 3 à 6. La tolérance est déterminée pour chaque palier, et à l'intérieur de tout palier elle demeure constante. Pour calculer la tolérance de fabrication dans un palier, on considère le diamètre moyen de ce palier :

$$D = (D_1 \times D_2)^{1/2}$$

- D : le diamètre moyen

- D1 et D2 : les diamètres extrêmes du palier.

Exemple :

Pour un arbre de diamètre 40 nom et de qualité 7 donc (K = 16).

Comme ce diamètre se trouve dans le palier 30 à 50 mm son diamètre moyen est de :

$$D = (30 \times 50)^{1/2}$$

$$It = [0,45 \times (30 \times 50)^{1/6} + 0,001 \times (30 \times 50)^{1/2}] \times 16 = 25 \text{ microns}$$

Principales qualités ou tolérances (IT) ISO													
<i>(IT en micromètre : 1µm = 0.001 mm)</i>													
dimensions nominales en mm													
au-delà de →	1	3	6	10	18	30	50	80	120	180	250	315	400
à (inclus) →	3	6	10	18	30	50	80	120	180	250	315	400	500
IT5	4	5	6	8	9	11	13	15	18	20	23	25	27
IT6	6	8	9	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40
IT7	10	12	15	18	21	25	30	35	40	46	52	57	63
IT8	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72	81	89	97
IT9	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155
IT10	40	48	58	70	84	100	120	140	160	185	210	230	250
IT11	60	75	90	110	130	160	190	220	250	290	320	360	400
IT12	100	120	150	180	210	250	300	350	400	460	520	570	630
IT13	140	180	220	270	330	390	460	540	630	720	810	890	970

IV.6. POSITION DES TOLERANCES

Dans le système ISO, la position des tolérances est représentée par une lettre majuscule (parfois deux) pour les alésages et une ou deux lettres minuscules pour les arbres.

Les différentes positions des tolérances de l'alésage en nombre de 29 donnent des écarts positifs puis négatifs au fur et à mesure que l'on avance dans l'alphabet, tandis que pour les arbres c'est le contraire, (fig.)

ALESAGES : A, B, C, CD, D, E, EF, F, FG, G, H, J, JS, K, M, N, O, P, R, S, T, U, V, X, Y, Z, ZA, ZB, ZC.

Arbres : a, b, c, cd, d, e, ef, f, fg, g, h, j, js, k, m, n, o, p, r, s, t, u, v, x, y, z, za, zb, zc.

Exemple :

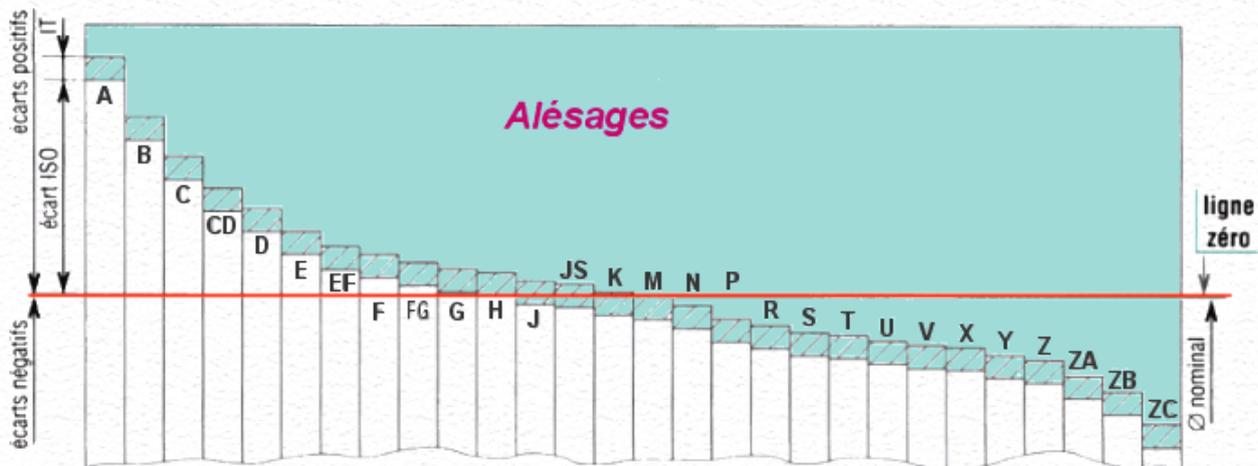
Position des alésages :

A à G : les zones de tolérance se trouvent au dessus de la ligne zéro. Tous les écarts sont positifs et les cotes réelles sont supérieures à la cote nominale.

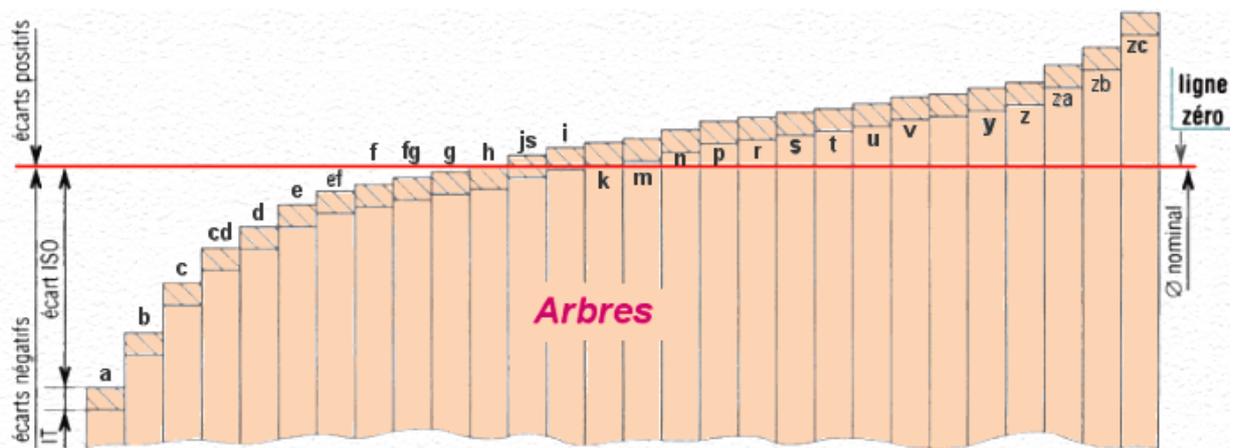
H : alésage normal dont la cote mini est égale à la cote nominale tel que $ES > 0$ et $EI = 0$.

JS : à cheval sur la ligne zéro tel que $|ES| = |EI|$

J : à cheval sur la ligne zéro tel que $|ES| < |EI|$



Alésage : position schématique des tolérances

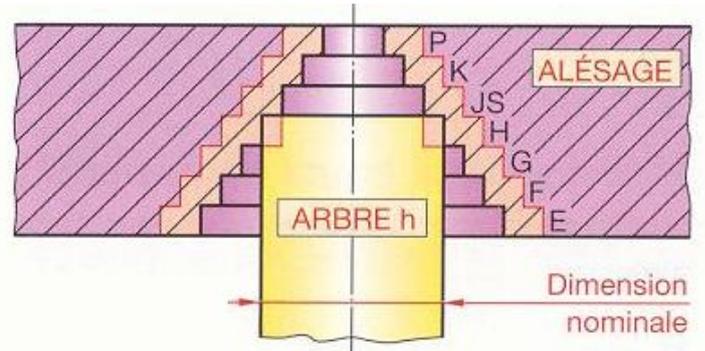


Arbre : position schématique des tolérances

IV.6.1. Système de l'arbre normal

La position pour les intervalles de tolérances de tous les arbres est donnée par la lettre h (écart supérieur nul).

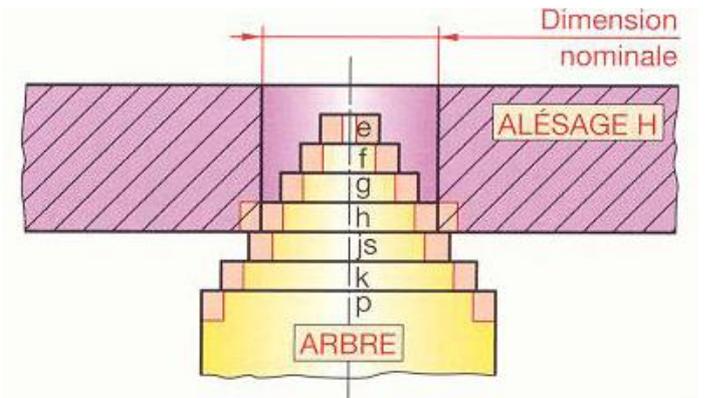
L'emploi de ce système est réservé à des applications bien définies : emploi d'arbre en acier étiré, logements des roulements, etc....



IV.6.2. Système de l'alésage normal

La position pour les intervalles de tolérances, de tous les alésages est donnée par la lettre H (écart inférieur nul).

C'est le système que l'on doit toujours employer (il est facile de réaliser des tolérances différentes sur un arbre que dans un alésage).



IV.7. INSCRIPTION DES TOLERANCES

Chaque dimension à usiner doit présenter sa valeur nominale (cote nominale) suivie du symbole de tolérance soit de la valeur numérique des deux écarts.

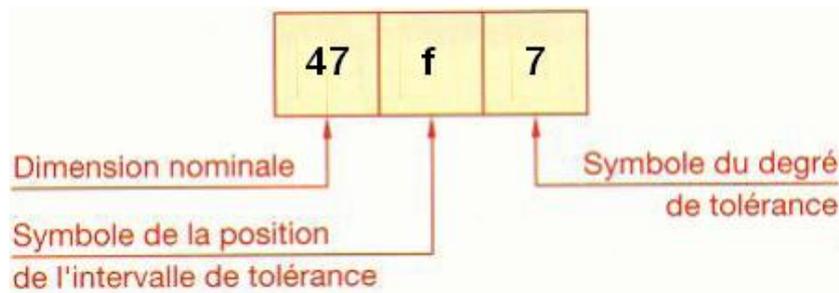
Exemple :

- 0,025

Ø 47 f7 ou arbre Ø 45 + 0,060

La première désignation des tolérances est utilisée généralement pour la fabrication en séries où le contrôle des pièces usinées s'effectue par des calibres limites (calibres tolérances).

La seconde est mieux utilisée dans la production unitaire où le contrôle s'effectue par les instruments universels de mesures.



Bibliographie

- 1- Spécification géométrique des produits (GPS), Indication des états de surface dans la documentation technique des produits, ISO 1302, AFNOR 2002. -Michel Dursapt,
- 2- Aide-mémoire, Métrologie dimensionnel Dunod, Paris, 2009
- 3- Frija Mounir. Appareils de Mesure ; Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Sousse
- 4- Physique et ingénierie des surfaces, A. CORNET, J.-P. DEVILLE, EDP Sciences, 1998.
- 5- Michel Dursapt, Aide-mémoire Métrologie dimensionnelle, Dunod, 2007
- 6- Mathieu ROUAUD, Calcul d'incertitudes, 2014
- 7- Guide du technicien en productique, Chevalier
- 8- Guide pratique de l'usinage – Tournage, fraisage