

Cours de Métrologie



Dr . Chihoub Rima

Université de Jijel

Faculté des sciences et de la technologie

Département de génie civil et hydraulique



Table des matières

I - Chapitre III :Caractéristiques métrologiques des appareils de mesures	3
1. Erreur et incertitude	3
2. Les caractéristiques métrologiques des appareils de mesure	5
3. Classification des erreurs de mesures	6
4. L'Intervalle de Confiance	8
5. L'Incultude Technique	9
6. L'Incultude des Mesures Totales	9
7. Interprétation des spécifications d'un dessin de définition en vue du contrôle	10
8. Les calibres et les jauge	11

Chapitre III :

Caractéristiques métrologiques des appareils de mesures

I

Les concepts d'**erreur** et d'**incertitude** sont fondamentaux en métrologie, car ils permettent d'évaluer la **qualité** et la **fiabilité** des résultats fournis par un appareil de mesure. Ces notions sont liées aux caractéristiques métrologiques des appareils de mesure, qui incluent des critères tels que la justesse, la précision, la fidélité, et la reproductibilité des appareils de mesure.

Comprendre ces éléments est essentiel pour choisir un appareil de mesure adapté à une tâche donnée et pour interpréter correctement les résultats obtenus.

1. Erreur et incertitude

1-1-*Erreurs* :

Les erreurs font référence aux écarts entre la valeur mesurée et la valeur vraie, et elles peuvent être de nature systématique ou aléatoire.

a-Erreur systématique: est une erreur qui se produit de manière régulière et prévisible, souvent causée par des imperfections dans l'instrument de mesure.

Erreur systématique=Valeur mesurée – Valeur vraie

b-Erreur aléatoire : Ce sont des erreurs imprévisibles qui varient à chaque mesure. Ces erreurs sont généralement réparties de manière aléatoire autour de la valeur vraie.

1-2-*incertitude*

L'incertitude englobe les erreurs, en particulier les erreurs aléatoires, et indique la plage dans laquelle la valeur vraie pourrait se trouver. L'incertitude est une mesure plus générale qui permet de quantifier la fiabilité des résultats.

a-L'incertitude absolue: est la valeur de l'écart ou de la marge d'erreur autour de la valeur mesurée, exprimée dans les mêmes unités que la grandeur mesurée.

$$x - \Delta x \leq x_0 \leq x + \Delta x$$

x : la valeur la plus probable de la grandeur mesurée G,

x_0 : la vraie valeur (qui nous est inconnue)

Δx : l'incertitude absolue

le résultat de la mesure s'écrit : $G = x \pm \Delta x$

Exemple :

La longueur d'un objet est de 25 ± 0.5 cm.

Cela signifie qu'avec une incertitude absolue $\Delta X = 0.5$ cm, la valeur exacte est comprise entre 24.5 cm et 25.5 cm.

b-L'incertitude relative : l'incertitude relative exprime l'incertitude en termes proportionnels par rapport à la valeur mesurée. Elle est souvent exprimée en pourcentage et permet de comparer l'incertitude de différentes mesures, quelle que soit leur échelle.

$X_{\text{rel}} = (\frac{X_{\text{absolue}}}{\text{Valeur mesurée}}) \times 100$

Exemple : Si l'incertitude absolue est 0,2 mm et que la mesure est de 25 mm, l'incertitude relative est $(0,2/25) \times 100 = 0,8\%$

c-Addition et Soustraction des Incertitudes

Supposons que la grandeur cherchée R soit la somme de 2 mesures A et B : $R = A + B$

Dans ce cas l'incertitude sur le résultat est : $\Delta R = \Delta A + \Delta B$

Il en est de même pour : $R = A - B$

→ l'incertitude absolue sur une somme ou une différence est la somme des incertitudes absolues de chaque terme.

Exemple :

Un récipient a une masse $m = 50 \pm 1$ [g]. Rempli d'eau, sa masse vaut : $M = 200 \pm 1$ [g]. La masse d'eau qu'il contient est donc :

$$m_{\text{eau}} = M - m = 200\text{g} - 50\text{g} = 150\text{g}$$

En appliquant la règle ci-dessus : $\Delta m_{\text{eau}} = \Delta M + \Delta m = 1 + 1 = 2$ [g],

il s'ensuit que : $m_{\text{eau}} = 150 \pm 2$ [g]

d-Multiplication et division :

Supposons maintenant que la grandeur cherchée R soit le résultat du calcul suivant :

$$R = \frac{A \cdot B}{C}$$

où A, B et C sont des grandeurs que l'on mesure. Dans ce cas l'incertitude relative sur le résultat est :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C}$$

→ l'incertitude relative sur un produit ou un quotient est la somme des incertitudes relatives de chaque terme.

2. Les caractéristiques métrologiques des appareils de mesure

2-1-Précision:

La précision est la capacité de l'instrument à donner des résultats répétables et cohérents lorsqu'une même grandeur est mesurée plusieurs fois, dans les mêmes conditions. Une mesure précise est une mesure qui présente une faible dispersion autour de la moyenne des mesures.

Types de précision :

a-Précision absolue : L'écart entre la valeur mesurée et la valeur réelle, exprimé en unités physiques.

b-Précision relative : L'écart entre la valeur mesurée et la valeur réelle exprimé par rapport à la valeur réelle, généralement en pourcentage.

Exemple : Si un baromètre mesure à plusieurs reprises la pression atmosphérique et donne des résultats de 1013 hPa, 1012,9 hPa et 1013,1 hPa, cet appareil est précis, car les résultats sont proches les uns des autres, même si la valeur vraie est légèrement différente.

2-2-Justesse (ou exactitude):

La justesse se réfère à la capacité d'un appareil à donner des résultats proches de la valeur vraie ou de la valeur de référence. C'est une mesure de l'erreur systématique (comme une mauvaise calibration).

La justesse est généralement mesurée en comparant les résultats obtenus par l'instrument avec une valeur de référence ou un étalon reconnu.

Exemple : Si un thermomètre mesure toujours 2 °C de plus que la valeur réelle, la justesse de l'appareil sera remise en question.

2-3- Fidélité

La fidélité est une mesure de la capacité de l'instrument à reproduire les mêmes résultats sous **des conditions constantes**. C'est une forme de précision sur une seule session de mesure, mais elle implique aussi la stabilité de l'instrument dans le temps, à travers de multiples répétitions dans un environnement stable.

La fidélité est généralement mesurée en répétant les mêmes mesures sur un même échantillon.

- Réduction en minimum de variation du à l'observateur
- Même observateur
- Même mode opératoire (Même instrument, même condition de mesure)
- Même lieu
- Répétition durant une période constante de temps

2-4- Résolution

La résolution désigne la plus petite différence ou variation que l'instrument peut détecter et afficher. Plus la résolution est élevée, plus l'instrument peut mesurer de petites variations dans la grandeur mesurée.

Exemples :

N°	Désignation des instruments de mesurage	Résolution (mm)
1	Réglet	0.5
2	Calibre à coulisse à vernier	0.02
3	Calibre à coulisse digital	0.01

2-5-Reproductibilité

La reproductibilité fait référence à la capacité d'un instrument à donner des résultats similaires dans **des conditions différentes**, telles que des changements d'opérateurs, de lieux, de temps ou d'autres facteurs externes.

La reproductibilité est donc une mesure **de stabilité externe**, car elle prend en compte les variations possibles dans l'environnement de mesure ou dans l'utilisation de l'instrument

3. Classification des erreurs de mesures

3-1-Définition

a. Valeur Brute

La valeur brute est le résultat direct d'une mesure effectuée à l'aide d'un instrument, sans correction ni ajustement pour les erreurs possibles. Elle peut être influencée par des erreurs systématiques ou aléatoires.

Exemple : Supposons que vous mesuriez la longueur d'une pièce avec un mètre ruban et que la lecture soit $L = 35,4$ cm. Ce chiffre est une valeur brute, sans correction.

b. Erreurs Systématiques

Les erreurs systématiques sont des erreurs qui se produisent de manière prévisible et qui ont une direction constante. Elles sont causées par des défauts dans l'instrument de mesure, des erreurs dans la méthode de mesure ou des influences environnementales constantes. Les erreurs systématiques peuvent être identifiées et corrigées une fois leur origine connue.

c. Valeur Brute Corrigée

La valeur brute corrigée est la valeur mesurée après l'application des corrections pour les erreurs systématiques identifiées. Cela permet de réduire ou d'éliminer l'impact des erreurs systématiques sur la mesure, rendant la mesure plus proche de la valeur vraie.

Formule générale :

$$\text{Valeur brute corrigée} = \text{Valeur brute} \pm \text{Correction}$$

Supposons que vous mesurez la température d'une substance avec un thermomètre, et que vous savez que cet instrument est mal calibré et donne systématiquement une lecture 2°C trop élevée.

- Si la valeur brute mesurée est $35,0^\circ\text{C}$, la valeur brute corrigée serait :

$$\text{Valeur brute corrigée} = 35,0^\circ\text{C} - 2^\circ\text{C} = 33,0^\circ\text{C}$$

3-2-Types d'erreurs de mesures :

Les erreurs de mesure peuvent être classées en plusieurs catégories :

- les erreurs fortuites (ou aléatoires),
- les erreurs parasites
- les erreurs systématiques estimées.

Chacune de ces catégories décrit des types d'erreurs distincts qui peuvent se produire pendant le processus de mesure

3-2-1- Erreurs Fortuites (ou Aléatoires)

Les erreurs fortuites, également appelées **erreurs aléatoires**, sont des erreurs qui surviennent de manière **imprévisible** et **aléatoire** à chaque mesure. Elles sont causées par des facteurs que l'on ne peut pas contrôler ou prévoir, comme des variations dans l'environnement ou des petites fluctuations dans l'instrument de mesure.

Ces erreurs peuvent être **réduites par la répétition** des mesures.

Les erreurs fortuites influencent principalement **la précision** (répétabilité des mesures), et non **la justesse**.

3-2-2- Erreurs Parasites

Les parasites sont **des interférences externes** qui peuvent affecter le résultat d'une mesure. Ces interférences peuvent être dues à **des bruits électriques**, **des perturbations électromagnétiques**, ou d'autres facteurs externes qui n'ont pas de lien direct avec le système mesuré, mais qui influencent les instruments de mesure.

Traitements des parasites :

Blindage : Utilisation de câbles blindés ou d'appareils de mesure protégés contre les interférences.

Filtrage : Mise en place de filtres pour éliminer les signaux parasites.

Isolation : Séparation des instruments sensibles des sources de parasites.

3-3-3- Erreurs systématiques

Les erreurs systématiques (ou erreurs déterminées) sont des erreurs qui se produisent de manière régulière et prévisible .

Type d'erreur systématique	Description	Méthode d'estimation
Erreur de calibrage	L'instrument ne mesure pas correctement en raison d'un mauvais calibrage.	Comparaison avec un étalon de référence, ajustement par étalonnage.
Erreur de température	Effet de la température sur l'instrument ou le matériau mesuré.	Utilisation de coefficients de correction thermique, étalonnage à différentes températures.
Erreur géométrique	Déformation ou défaut dans la géométrie de l'instrument (ex. parallaxe).	Comparaison avec un modèle géométrique ou un étalon.
Erreur de positionnement	Mauvaise position de l'instrument ou de l'objet mesuré.	Vérification systématique des conditions de mesure, calibrage régulier.
Erreur due à l'usure de l'instrument	Changement de performance de l'instrument au fil du temps.	Vérification périodique avec étalon et ajustement.

4. L'Intervalle de Confiance

L'intervalle de confiance est une estimation de l'incertitude d'une mesure ou d'une moyenne basée sur un échantillon de données. Il nous donne une plage de valeurs, calculée à partir des données mesurées, dans laquelle on estime que la valeur réelle (ou vraie) de la grandeur mesurée se situe, avec un certain niveau de confiance.

4-1-Calcul de l'Intervalle de Confiance :

L'intervalle de confiance pour la moyenne d'un échantillon de données est généralement calculé avec la formule suivante :

$$IC = \left[\bar{x} - k \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{x} + k \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$$

Où :

- \bar{x} = moyenne des mesures
- k = facteur de confiance (par exemple, 1.96 pour un niveau de confiance de 95 %)
- σ = écart-type de l'échantillon (mesure de la dispersion des données)
- n = taille de l'échantillon (le nombre de mesures réalisées)

 **Exemple**

Supposons qu'un échantillon de 10 mesures de la température T donne la moyenne suivante :

$$\bar{x} = 20.00 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \sigma = 0.10 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad n = 10$$

Si nous voulons calculer l'intervalle de confiance à 95 % (avec $k = 1.96$) :

$$IC = \left[20.00 - 1.96 \times \frac{0.10}{\sqrt{10}}, 20.00 + 1.96 \times \frac{0.10}{\sqrt{10}} \right]$$

Calculons :

$$IC = [20.00 - 1.96 \times 0.03162, 20.00 + 1.96 \times 0.03162]$$

$$IC = [20.00 - 0.0619, 20.00 + 0.0619]$$

$$IC = [19.9381, 20.0619] \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cet intervalle nous indique qu'avec une probabilité de 95 %, la véritable température se situe entre 19.9381 °C et 20.0619 °C.

5. L'Incertitude Technique

L'incertitude technique (ou incertitude de l'instrument) fait référence à l'erreur possible associée à l'instrument de mesure lui-même. Elle est généralement déterminée par le fabricant de l'appareil et peut être influencée par plusieurs facteurs, tels que :

- La précision de l'instrument.
- Les tolérances de fabrication.
- Les conditions de fonctionnement de l'instrument (température, usure, etc.).

Exemple :

Si un micromètre a une incertitude technique de ± 0.002 mm, cela signifie que toutes les mesures effectuées avec cet instrument seront affectées par une erreur possible de ± 0.002 mm, indépendamment des conditions de l'expérience.

6. L'Incertitude des Mesures Totales

L'incertitude totale est la somme de toutes les sources d'incertitude qui peuvent influencer le résultat de la mesure. Cela comprend l'incertitude technique de l'instrument, l'incertitude de l'opérateur (erreurs de lecture), ainsi que les effets environnementaux (comme la température, l'humidité, etc.).

Lorsque plusieurs sources d'incertitude sont indépendantes, l'incertitude totale se calcule par la somme quadratique des différentes incertitudes :



$$u_{\text{totale}} = \sqrt{u_{\text{instrument}}^2 + u_{\text{opérateur}}^2 + u_{\text{environnement}}^2}$$

Où :

- $u_{\text{instrument}}$: incertitude de l'instrument
- $u_{\text{opérateur}}$: incertitude liée à l'opérateur (erreurs de lecture)
- $u_{\text{environnement}}$: incertitude due aux conditions environnementales

Exemple

Supposons que pour une mesure de la longueur d'une pièce, vous avez les incertitudes suivantes :

- Incertitude de l'instrument : ± 0.02 mm
- Incertitude de lecture (opérateur) : ± 0.01 mm
- Incertitude environnementale : ± 0.01 mm

L'incertitude totale sera :

$$u_{\text{totale}} = \sqrt{(0.02)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2} = \sqrt{0.0004 + 0.0001 + 0.0001} = \sqrt{0.0006} = 0.0245 \text{ mm}$$

Ainsi, l'incertitude totale est ± 0.0245 mm.

7. Interprétation des spécifications d'un dessin de définition en vue du contrôle

Définition

Le dessin de définition est un document, établi par le bureau d'études, qui représente un cahier des charges ou un contrat entre les concepteurs (bureau d'étude), ceux du bureau des méthodes et les métrologues (contrôle de qualité).

L'étude du dessin de définition aura une incidence sur :

- le type et la capacité des machines choisies pour réaliser les usinages
- les paramètres de coupe
- le repérage des surfaces à usiner.

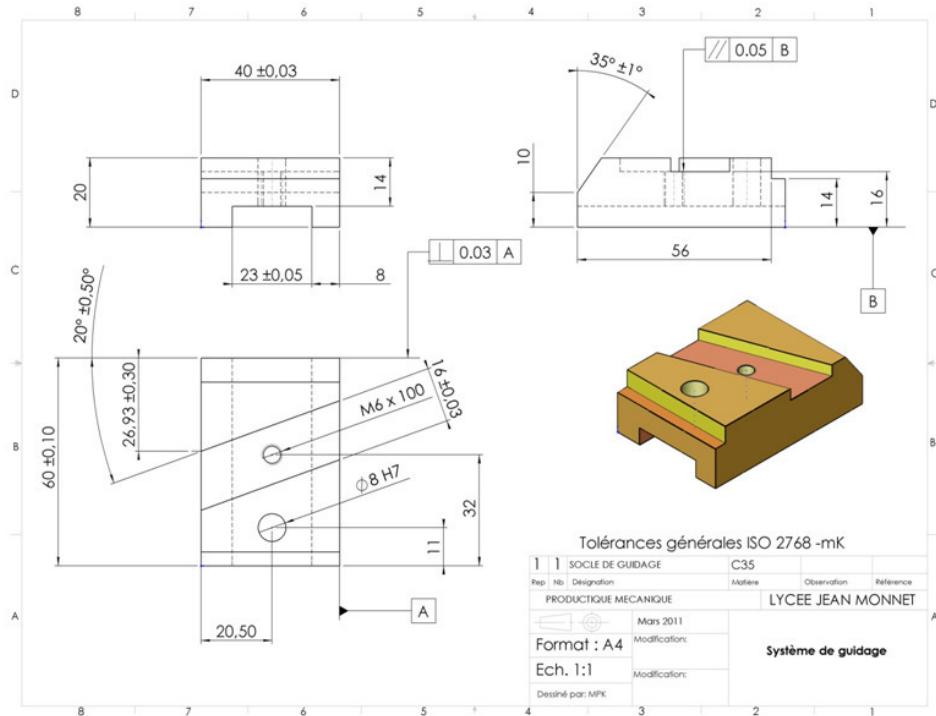


Figure 1 : Dessin de définition d'un produit fini

8. Les calibres et les jauge

Les calibres et les jauge sont des outils utilisés de manière complémentaire. Tandis que les calibres sont souvent utilisés pour des mesures directes avec une grande précision, les jauge permettent un contrôle rapide et efficace de la conformité d'une pièce avec ses spécifications.

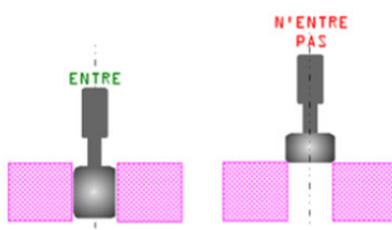
8-1- Les calibres :

Les calibres sont des instruments de mesure utilisés pour vérifier les dimensions ou la forme d'une pièce par rapport à une tolérance spécifiée. Ils sont essentiels pour effectuer des contrôles rapides et précis lors de la fabrication ou de l'assemblage de pièces

Les calibres peuvent être utilisés pour mesurer :

- des dimensions extérieures (comme des diamètres ou des épaisseurs),
Exemples : Calibres à anneau, calibres à cône extérieur.
- des dimensions internes (comme des alésages ou des trous),
Exemples : Calibres à alésage, calibres à cône intérieur.
- ainsi que pour vérifier des formes géométriques (comme la planéité, la rectitude, etc.).
Exemple: Calibre de forme , Calibre de profil

Mesure intérieure (exemple : alésage) : pièce dans la tolérance



Mesure intérieure : pièce hors tolérance

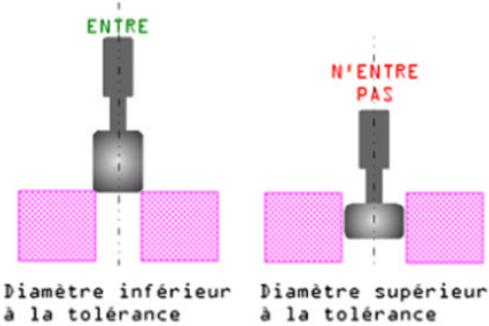
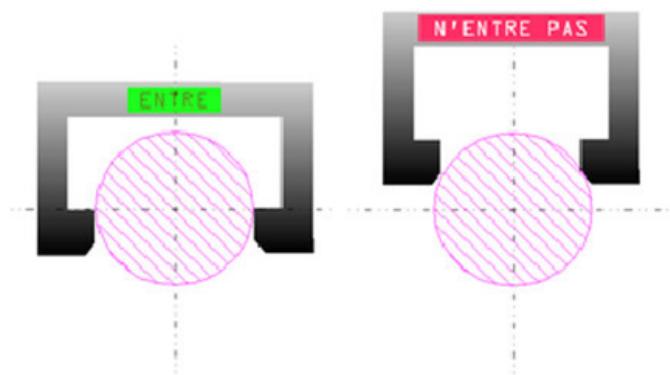


figure 2 : calibre intérieure

Mesure extérieure (exemple : diamètre d'un arbre) : pièce dans la tolérance



Mesure extérieure : pièce hors tolérance

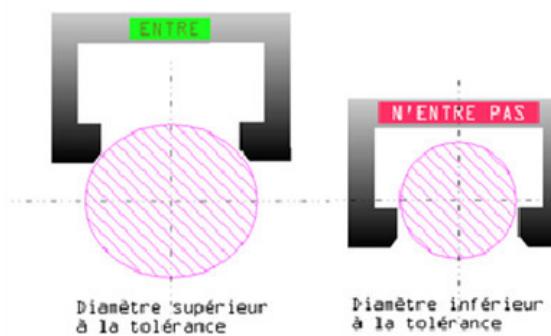


figure 3 : Calibre extérieure

a-Contrôle de formes lisses

En métrologie et dans le domaine de l'usinage, les termes **alésage** et **arbre** désignent des éléments souvent associés à des pièces mécaniques, notamment dans le cadre des assemblages de machines, de moteurs ou d'autres dispositifs nécessitant des ajustements précis

a-1-Un Alésage: est un trou cylindrique réalisé dans une pièce, généralement pour accueillir un arbre, un axe, ou une autre pièce cylindrique

- Le calibre utilisé pour vérifier un alésage est appelé un tampon, Il permet de déterminer si l'alésage est conforme à une norme ou une spécification (par exemple, s'il est trop petit ou trop grand).



Tampon lisse double



Tampon lisse plat

a-2- Arbre :

En métrologie, un arbre désigne généralement **une pièce cylindrique** qui sert à transmettre un mouvement ou une force dans des mécanismes.

Par exemple, un arbre peut être utilisé dans un moteur pour transmettre la rotation ou dans un assemblage mécanique pour transmettre une force.

- les calibres utilisés pour mesurer les dimensions des arbres sont appelés mâchoires, qui se déclinent en plusieurs modèles, chacun ayant des spécifications et des applications différentes pour le contrôle des dimensions, tel que :

1. Mâchoires doubles avec un côté « ENTRE » et un côté « N'ENTRE PAS
2. des mâchoires simples,
3. des mâchoires simples dites à l'enfilade,
4. des mâchoires réglables



Type de mâchoire	Description	Principe de fonctionnement	Applications
Mâchoires doubles (ENTRE et N'ENTRE PAS)	Calibre avec deux faces : une côté ENTRE (dimension minimale) et l'autre côté N'ENTRE PAS (dimension maximale).	Permet de vérifier à la fois la dimension minimale et maximale de la pièce avec un seul outil.	Vérification rapide des tolérances sur les pièces de série (arbres, axes, etc.).
Mâchoires simples	Calibre à deux mâchoires fixes ou réglables, utilisé pour mesurer un seul diamètre (externe).	Les deux mâchoires sont insérées autour de la pièce pour mesurer son diamètre.	Mesure d'un diamètre simple, utilisée pour des pièces de tailles standards.
Mâchoires simples à l'enfilade	Mâchoires longues, spécialement conçues pour mesurer des pièces longues ou de grande dimension.	Mâchoires plus longues qui s'enfilent autour de la pièce pour mesurer son diamètre.	Contrôle des pièces longues comme des arbres, axes de transmission, etc.
Mâchoires réglables	Calibre dont les mâchoires sont ajustables pour mesurer une gamme de dimensions.	Les mâchoires peuvent être ajustées manuellement ou mécaniquement pour mesurer différentes tailles.	Utilisation flexible dans des environnements où les dimensions sont variables ou non standards.



Mâchoire réglable



Mâchoire double



Mâchoire dite par enfilade

b- Contrôle de filetage

b-1-Filetage cylindrique : Le contrôle est ici effectué avec quatre tampons :

- deux tampons (filetage intérieur) ou bagues (filetage extérieur) lisses (ENTRE et N'ENTRE PAS)

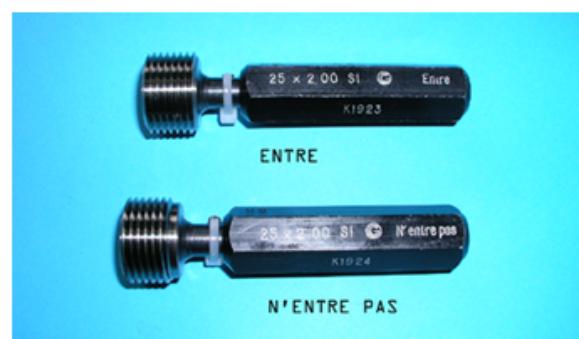
- deux tampons (filetage intérieur) ou bagues (filetage extérieur) filetées (ENTRE et N'ENTRE PAS)

b-2-Filetage conique : le contrôle s'effectue à l'aide d'un calibre lisse qui vérifie le cône en sommet de filet et un calibre fileté qui vérifie le cône à flanc de filet.

Filetage cylindrique



Tampon fileté double



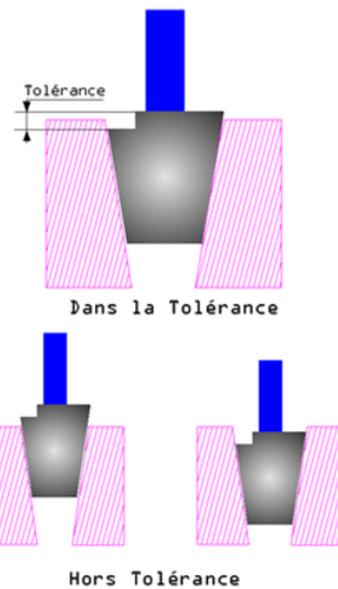
Tampons filetés simples



Bagues



Filetage conique



8-2- Les jauge

Une jauge est un instrument de mesure qui sert principalement à comparer une pièce à une dimension ou une forme standard, souvent pour un contrôle rapide.

Les jauge sont généralement plus simples et plus spécifiques que les calibres et sont souvent utilisées pour des contrôles de passage ou des tests de conformité dans les processus de production en série.

8-2-1-Types de Jauge

- Jauge de contrôle** (ou jauge go/no go") : Utilisée pour vérifier si une dimension ou une caractéristique d'une pièce se situe dans une tolérance donnée. Elle est souvent utilisée pour vérifier des dimensions simples comme les diamètres ou la profondeur des trous. Il existe deux côtés : un côté « go » qui doit passer, et un côté « no go » qui ne doit pas passer.

Exemple : Jauge de contrôle pour vis, pour vérifier si le filetage est conforme.

- Jauge de filetage** : Permet de contrôler le pas, le profil et la profondeur des filetages d'une vis.
- Jauge de profondeur** : Utilisée pour vérifier la profondeur d'un trou ou d'un alésage.
- Jauge de largeur** : Vérifie si une pièce respecte une largeur spécifique.



Jauge de profondeur



Jauge de profondeur numérique



Jauge de contrôle (ou jauge go/no go")



Jauge de filetage

Les Instruments de Mesures Simples :

les instrument de mesure simples sont des outils de base utilisés pour effectuer des mesures de dimensions moins complexes. Ces instruments sont généralement plus faciles à utiliser et offrent une précision moins élevée que les calibres et les jauge de contrôle.

- Types d'Instruments de Mesure Simples:

Règle , compas , pied a coulisse (analogique ou numérique), gabarits ou cale ...etc



figure 4 : Exemple de quelques instruments de mesures simples