INSTITUT NATIONAL SUPERIEUR DES

SCIENCES ET TECHNIQUES D'ABECHE

(INSTA)

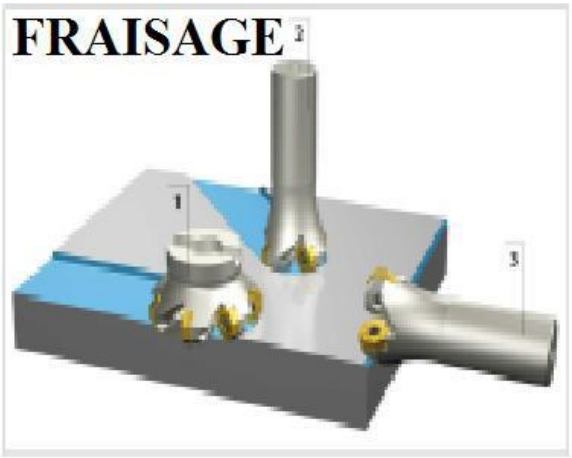
Départements de Génies Mécanique,

Electrique & Energétique

Cours sur la Fabrication Mécanique I

Niveau : I









Chargé de cours : M. ABDALLAH BAN-NAH Mahamat

Année Académique 2024-2025

Table des matières

I. Introduction générale 5
1. Définition 5
2. Méthodes d'obtention des pièces 5
2.1. Obtention par enlèvement des matières 5
2.1.1. Tournage 6
2.1.2. Fraisage 6
2.1.3. Perçage 6
2.2. Obtention par fusion 7
2.2.1. Moulage en sable 7
2.2.2. Moulage métallique 7
2.2.2.1. Moulage par gravité 7
2.2.2.2. Moulage à basse pression 8
2.2.2.3. Moulage sous pression (ou moulage par injection) 8
2.3. Obtention par déformation plastique 8
2.3.1. Extrusion (ou filage) 8
2.3.2. Laminage 9
2.3.3. Forgeage libre 9
2.3.4. Estampage et matriçage 10
2.4. Obtention par assemblage 11
2.4.1. Soudage 11
2.4.1.1. Soudage à l'arc électrique 12
2.4.1.2. Brasage (soudage à la flamme) 12
2.4.2. Rivetage 13
2.5. Obtention par fabrication additive 13
3. Normalisation 14
3.1. Normalisation française 14
3.2. Pourquoi la normalisation ? 14
3.3. Normes françaises 14
II. Système ISO de tolérance 15
1. Nécessité de la tolérance 15
2. Système ISO 15
3. Principe 15
4. Désignation des tolérances 17

5. Position schématisée des tolérances dans le cas des ajustements 17
5.1. Système à alésage normal (EI = 0) 17
5.2. Système à arbre normal (es = 0) 18
6. Représentation des tolérances dans le système International ISO 20
6.1. Qualité 20
6.2. Position 20
III. Étude des ajustements 20
1. Ajustement avec jeu 21
2. Ajustement avec serrage 22
3. Ajustement incertain 24
4. Caractéristiques des ajustements 25
4.1. Qualité 25
4.2. Zone de tolérance 26
4.3. Palier de diamètre 27
5. Choix des tolérances d'ajustement 28
6. Normalisation des tolérances 32
IV. Matériaux utilisés en construction mécanique 33
1. Introduction 33
2. Classification des matériaux 33
2.1. Matériaux métalliques 34
2.1.1. Métaux ferreux 34
2.1.1.1. Aciers…. 34
2.1.12. Fontes 36
2.1.2. Métaux non ferreux 37
2.1.2.1. Aluminium et ses alliages 37
2.1.2.2. Cuivre et ses alliages 38
2.2. Polymères ou matières plastiques 38
2.2.1. Thermoplastiques 39
2.2.2. Thermodurcissables 39
2.2.3. Élastomères ou caoutchoucs 39
2.3. Céramiques 39
2.4. Matériaux composites 40
V. Essais des matériaux 41
1. But des essais 41

2. Classifications des essais 41
2.1. Essais statiques 41
2.2. Essais dynamiques 41
2.3. Essais complémentaires 41
2.4. Essais de travail 41
2.5. Essais chimiques 41
3. Étude des principaux essais 41
3.1. Essai de traction 42
3.1.1. Définition 42
3.1.2. Éprouvettes 42
3.1.3. Diagramme de l'essai de traction 43
3.1.4. Caractéristiques mécaniques 44
3.2. Essais de dureté 45
3.2.1. Essai de dureté Brinell 46
3.2.2. Essai de dureté Vickers 47
3.2.3. Essai de dureté Rockwell 47
3.3. Essais au choc 48
3.3.1. Généralités 48
3.3.2. Essai de résilience 48
3.3.2.1. Définition 48
3.3.2.2. Éprouvette 48
3.4. Machines d'essais 49
3.4.1. Mouton ordinaire 49
3.4.2. Mouton de Frémont 49
3.4.3. Mouton pendulaire de Charpy 50
3.5. Essai de fluage 51

I. Introduction générale

La fabrication mécanique est une discipline transversale qui va de l'économie des ressources à la sociologie des goûts du consommateur, en passant par la science des matériaux, la physicochimie du solide ensuite les techniques de conception et de production. Les objets qui nous entourent, que nous manipulons quotidiennement, sont tous constitués d'une matière choisie pour sa bonne adaptation à la fonction et au procédé d'usinage utilisé, c'est pour conférer à l'objet la forme souhaitée.

1. Définition

On appelle technologie de fabrication l'ensemble des savoirs et des pratiques fondés sur les principes scientifiques (mathématiques et physiques) dans un domaine technique. C'est aussi des techniques et méthodes qui consistent à obtenir une pièce ou un objet par transformation de matière brute. La technologie de fabrication est aussi l'étude des outils, des machines et des techniques utilisées dans l'industrie, bref elle est la théorie générale des techniques qui conduit à un procédé de fabrication. Pour obtenir la pièce désirée, il est nécessaire parfois d'utiliser successivement de différents procédés de fabrication, c'est-à-dire de nombreuses techniques visant l'obtention d'une pièce par transformation de matière brute.

Exemples : la technologie de l'information, la technologie nucléaire…

Dans notre présente étude on se limitera à la technologie de fabrication qui est constituée des trois technologies indispensables à savoir :

- La technologie de construction qui analogue au dessin technique ou dessin industriel ;
- La technologie professionnelle (spécialité) ;
- La technologie générale.

2. Méthodes d'obtention des pièces

L'usinage peut être classé en fonction de son action sur le matériau qu'il transforme. Nous pouvons classer en deux grandes parties à savoir l'usinage sans enlèvement de matière (copeaux) et l'usinage par enlèvement de matière, donc le choix d'un procédé d'obtention dépend de nombreux facteurs, dont le matériau, les formes de la pièce, l'état de surface ou la qualité, la précision ou la tolérance etc. dans ce présent document nous ne mentionnons que les cinq méthodes d'obtention des pièces à savoir :

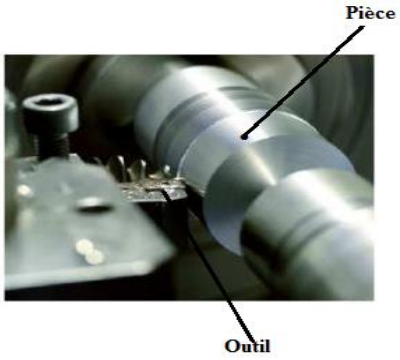
- ✓ Obtention par enlèvement des matières ;
- ✓ Obtention par fusion ;
- ✓ Obtention par déformation plastique ;
- ✓ Obtention par assemblage ;
- ✓ Obtention par fabrication additive.

2.1. Obtention par enlèvement des matières

L'enlèvement de copeaux est l'élimination de l'excès de matière dans une pièce brute pour obtenir une pièce prête à être utilisée dans un procédé de fabrication. La méthode consiste à obtenir la forme finale par arrachements de petits morceaux de matière dits des copeaux. D'une manière générale on appelle usinage des procédés. On y distingue : le tournage, le fraisage, le perçage, le sciage…

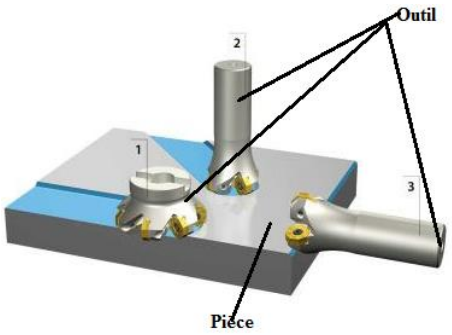
2.1.1. Tournage

En tournage (sur un tour classique ou à commande numérique CN et un outil de coupe à un seul bord c'est-à-dire à dent unique), le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce serrée entre les mors d'un mandrin ou dans une pince spécifique, tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de l'outil coupant. Le tournage permet principalement d'obtenir des formes de révolution autour de l'axe de rotation de la pièce.



2.1.2. Fraisage

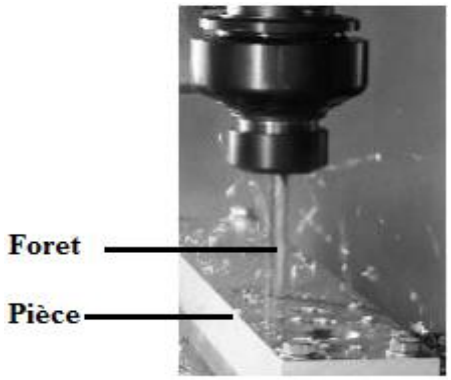
En fraisage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de l'outil (la fraise à plusieurs dents), tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de la pièce maintenue dans un étau lui- même posé sur la table de la fraiseuse. Le fraisage classique permet principalement d'obtenir des formes prismatiques, mais le fraisage par CN permet d'obtenir des formes pouvant être très complexes.



2.1.3. Perçage

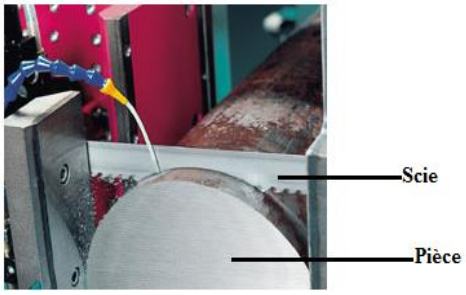
Le perçage est une opération de forage dans laquelle, l'outil appelé foret reçoit le mouvement de coupe par rotation autour de son axe et le mouvement d'avance par translation suivant l'axe

du foret. Autrement dit le perçage est une opération pour faire des trous circulaires (borgne ou débouchant) dans une pièce, qui effectue le mouvement de coupe dans une direction parallèle à son axe de rotation pour former le trou.



2.1.4. Sciage

Il utilise une lame de scie (outil avec une série de dents étroitement espacées) pour générer une rainure étroite à l'intérieur de la pièce qui peut la séparer en deux parties ou non, générant l'excès dans l'ébauche. Il s'agit d'un procédé de fabrication fondamental**,** car de nombreuses industries l'exigent à certains moments de sa séquence. La lubrification est fortement conseillée pour éviter l'échauffement et l'usure prématurée des dents.



2.2. Obtention par fusion

Cette technique consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée (formes intérieure et extérieure) en limitant autant que possible les travaux ultérieurs de finition. Elle comprend : le moulage métallique, en sable ou par injection, le frittage…

2.2.1. Moulage en sable

Le démoulage s'effectue par destruction du moule. On doit donc fabriquer autant de moules que de pièces à fabriquer. Il existe plusieurs techniques d'obtention du moule en sable (sable humide ; durcissement thermique, chimique ou physique). Le moule en sable est obtenu à partir d'un modèle permanent (généralement en bois, en résine ou en métal) ou unique (en cire ou en polystyrène) dans le cas du moulage à modèle perdu.

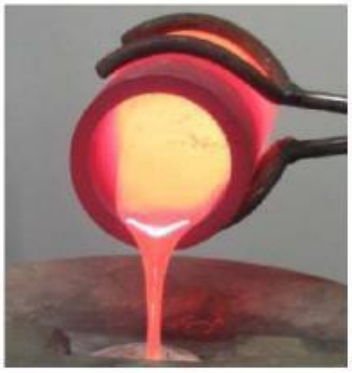
L'intérêt de cette technique est que le sable est réfractaire (il résiste à la chaleur), et que le moule ne coûte pas cher à fabriquer. Par contre, l'état de surface (Ra » 3,2 mm) et la précision obtenus sont assez mauvais. Cette technique convient bien pour des petites séries.

2.2.2. Moulage métallique

Le moule métallique est réutilisable plusieurs fois. Le démoulage est rendu possible par la différence de matière entre le moule et le métal coulé. Le moule subit toujours un poteyage (agent de protection physico-chimique) avant introduction du métal en fusion, il est enduit d'un liquide protecteur qui facilitera le démoulage. Le moulage métallique est classé en trois catégories selon la pression d'introduction du matériau liquide dans le moule : par gravité, sous pression et par injection.

2.2.2.1. Moulage par gravité

La pression est nulle, le matériau liquide est introduit par le haut et rempli le moule par gravité. L'état de surface (Ra » 1,6 mm) et la précision obtenus sont moyens. Cette technique, dont l'outillage est moins coûteux que les suivantes, est adaptée pour les petites séries.

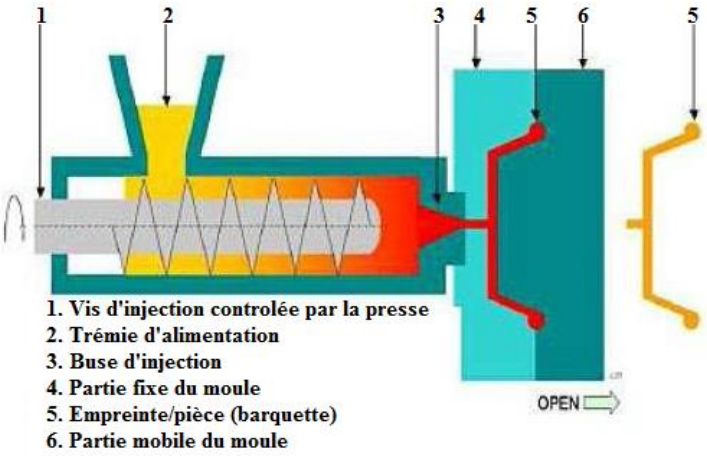


2.2.2.2. Moulage à basse pression

La pression est faible (0,2 à 2 bars), le matériau liquide est introduit par le bas. Le procédé est semi-automatique, et souvent considéré comme une amélioration du moulage par gravité. Le coût de l'outillage est plus élevé, les cadences sont plus importantes, et l'état de surface et la précision sont meilleurs. Cette technique est adaptée pour les petites ou grandes séries.

2.2.2.3. Moulage sous pression (ou moulage par injection)

La pression d'injection du matériau liquide est importante (entre 50 et 200 bars). Ce procédé est souvent automatisé et permet de grandes cadences de production (jusqu'à 500 pièces / heure). Le coût de l'outillage est très élevé. L'état de surface et la précision des pièces obtenues sont bons. Cette technique est adaptée pour les très grandes séries.



1. Vis d'injection controlée par la presse
2. Trémie d'alimentation
3. Buse d'injection
4. Partie fixe du moule
5. Empreinte/pièce (barquette)
6. Partie mobile du moule

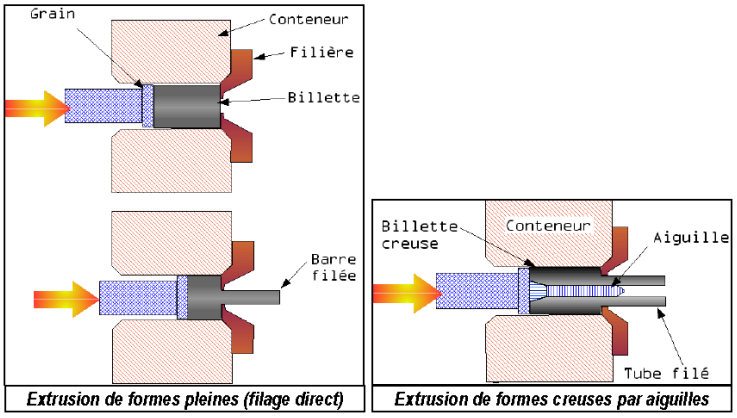
2.3. Obtention par déformation plastique

Elle consiste à déformer plastiquement le matériau à chaud ou à froid jusqu'à l'obtention de la forme désirée autrement dit c'est la production de pièces de formes et de matériaux divers, à partir d'un lopin par déformation plastique par chocs ou pression, à froid ou à chaud. On peut citer entre autres : extrusion, estampage, tréfilage, forgeage, laminage etc.

2.3.1. Extrusion (ou filage)

Principe de l'extrusion (appelée aussi filage pour les métaux) :

Un matériau chauffé et compressé est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir. Cette technique permet d'obtenir en continu un produit pouvant être très long (barre, tube, profilé, tôle…).



Extrusion de formes pleines (filage direct) *Extrusion de formes creuses par aiguilles*

Avantages :

- Meilleure précision que le matriçage ou l'estampage ;
- Bons états de surface ;
- Sections des profilés pouvant être creux et très complexes

Inconvénients :

- Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud) ;
- Formes limitées à des « extrusions »

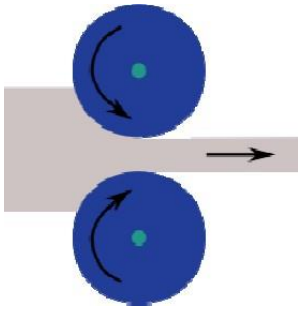
2.3.2. Laminage

Principe :

Le matériau est déformé par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés appelés laminoirs. Le laminage peut s'effectuer à froid ou à chaud.

Les laminoirs sont souvent utilisés les uns à la suite des autres afin de réduire progressivement l'épaisseur des profilés.

La plupart des tôles plates brutes sont obtenues par laminage.



2.3.3. Forgeage libre

Le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur un matériau, à froid ou à chaud, afin de le contraindre à épouser la forme voulue.

Principe du forgeage libre :

Sous l'action d'une forte pression ou d'une succession de chocs, un bloc de métal chauffé (800 à 1200 °C) se déforme plastiquement vers les surfaces restées libres. Aucune matrice ne délimite la déformation du matériau, et la forme obtenue dépend fortement du savoir-faire de l'opérateur. Il peut s'effectuer avec un outillage manuel ou à l'aide d'un marteau-pilon ou d'une presse hydraulique.

La forge libre permet d'obtenir des ébauches ou des pièces brutes, et n'est pas adapté au travail en série.

Avantages :

- Pas d'outillage spécialisé selon la pièce à obtenir ;
- Les pièces forgées ont une résistance mécanique supérieure aux mêmes pièces usinées, du fait du fibrage de la pièce consécutif au forgeage.

Inconvénients :

- Nécessite beaucoup d'énergie (métal chauffé) ;
- La précision est médiocre.



forgeage libre au marteau manuel



forgeage libre au marteau pilon

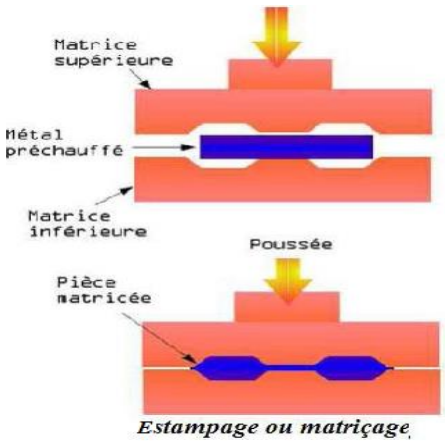
2.3.4. Estampage et matriçage

L'estampage est le forgeage mécanique des aciers, tandis que le matriçage est le forgeage mécanique des métaux non ferreux.

Principe :

Un lopin de métal chauffé et calibré (avec des dimensions précises) se déforme pour remplir les deux demi-empreintes de deux matrices appliquées l'une contre l'autre sous l'action d'une forte pression ou d'une série de chocs.

L'estampage et le matriçage sont adaptés à une production en série.



Estampage ou matriçage

Avantages :

- Les mêmes que pour le forgeage libre, avec plus de rapidité et une meilleure précision.

Inconvénients :

- Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud) ;
- Prix de revient élevé des matrices rapidement « usées ».

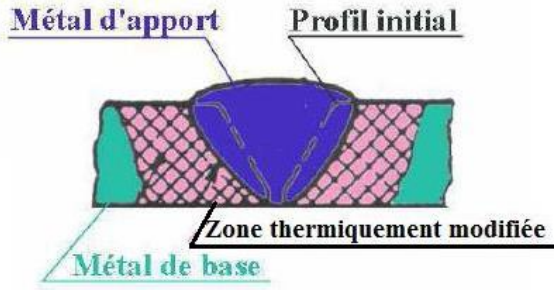
2.4. Obtention par assemblage

Les techniques d'assemblage ne font pas partie des procédés de fabrication, mais elles interviennent une fois que les différentes pièces ont été fabriquées. On parle de procédé de fabrication pour tous les objets. L'assemblage comprend : le soudage, le collage, le boulonnage, le rivetage etc.

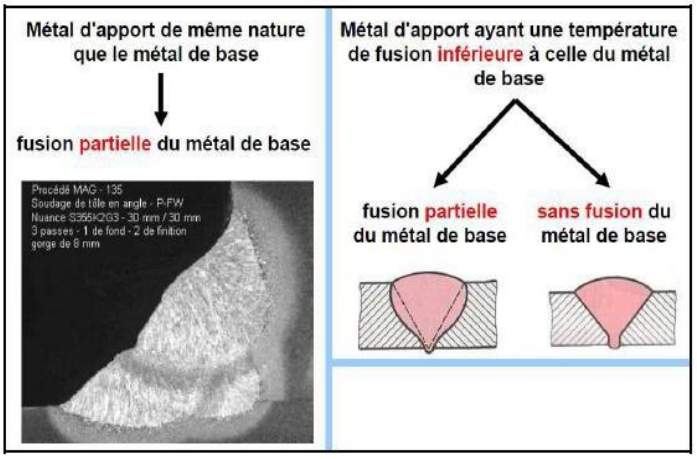
2.4.1. Soudage

On appelle soudage les procédés d'assemblages permanents et non-démontables qui créent une continuité de matière entre les pièces assemblées. La continuité est obtenue par un échauffement de la zone interface entre les pièces avec ou sans apport de matière qu'on appelle ***Zone Affectée Thermiquement (Z.A.T).*** En exemple d'application on peut citer :

- Mécano-soudage : assemblage de formes simples soudées entre elles pour réaliser une pièce de forme complexe ;
- Assemblage avec continuité électrique, ou étanchéité…



Classification des soudages en fonction de la Z.A.T :



Les différentes techniques de soudage sont :

- Soudure avec métal d'apport (Arc électrique, électrode enrobée, MIG-MAG Metal Inert Gas).

Ce procédé utilise un gaz "neutre" pour souder les aciers fortement alliés et les métaux non-ferreux. Les g*az neutres* sont : Argon (gaz de base des mélanges) et Hélium (en mélange).

- Soudure sans métal d'apport (Par friction Par résistance Laser etc.).

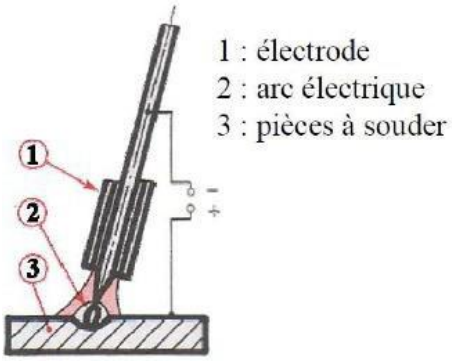
2.4.1.1. Soudage à l'arc électrique

Principe : En soudage à l'arc, l'énergie calorifique est produite par un arc jaillissant entre une électrode et les pièces à assembler.

Le métal d'apport est constitué de l'électrode elle-même ou par une baguette indépendante (dans ce cas, l'électrode est en matériau réfractaire)

Oxydation et protection :

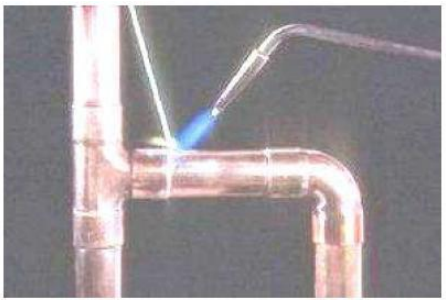
A haute température, l'oxygène de l'air vient oxyder les matériaux soudés. Il faut donc protéger le cordon de soudure en l'isolant soit par un flux solide soit par une barrière gazeuse.



2.4.1.2. Brasage (soudage à la flamme)

Le brasage permet la jonction entre des alliages métalliques, à l'aide d'un métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à celui (ou ceux) du (ou des) métal (aux) de base.

Le chauffage à une température suffisante pour fondre le métal d'apport provoque « l'accrochage » de celui-ci avec le métal de base grâce au phénomène de diffusion.



2.4.2. Rivetage

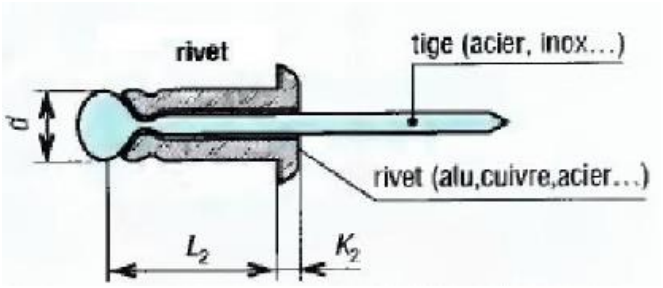
Les rivets sont utilisés par toutes les industries pour l'assemblage indémontable des petits ou de grands composants. L'assemblage d'une structure d'avion exige près de 2500000 rivets dont la pose représente 30 % du temps total de montage.

Avantages :

- Sécurité de fixation ;
- Économique ;
- Assemblage des matières différentes et d'épaisseurs différentes ;
- Assemblages résistants au phénomène de fatigue contrairement au soudage.

Inconvénients :

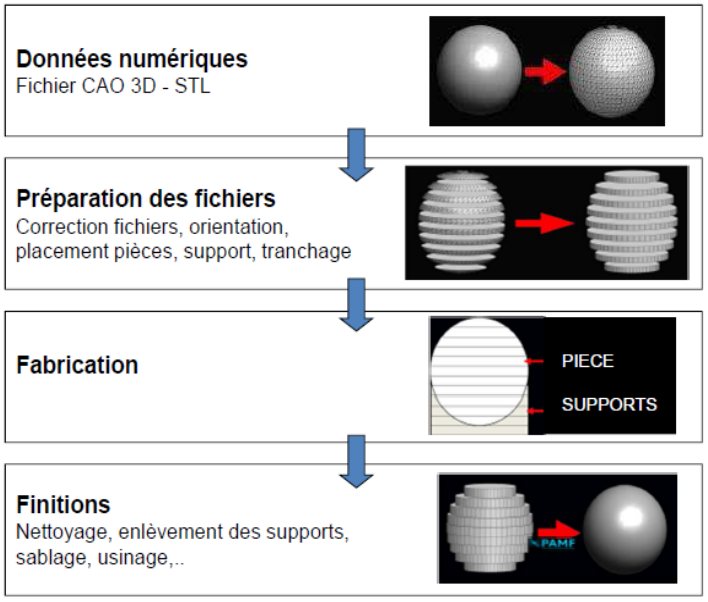
- Non démontable ;
- têtes protubérants (bosses).



2.5. Obtention par fabrication additive

La fabrication additive s'oppose à la fabrication soustractive où l'on enlève de la matière pour atteindre la forme désirée. Dans la fabrication additive, les pièces en 3D sont construites par addition de couches successives de matière sous contrôle d'un ordinateur. Autrement dit c'est un procédé de création d'objets tridimensionnels à partir d'un fichier numérique. Ce procédé est dit additif, car la fabrication repose sur la superposition de fines couches de matière, une par une. Les premiers procédés utilisant ce principe sont apparus à la fin des années 1980.

La fabrication additive désigne les procédés de fabrications par l'ajout de matière assistés par ordinateur, elle décrit les technologies qui peuvent être utilisées n'importe où dans le cycle de d'un produit depuis la pré-production (prototypage rapide) à la production à grande échelle (fabrication rapide) et même pour les applications d'outillages.



Dans la suite nous nous consacrons à la méthode d'obtention par enlèvement des matières qui est la plus dominante dans le milieu industriel et qui donne l'importance à la technologie de fabrication à travers les différents procédés de l'usinage précédemment cités.

3. Normalisation

3.1. Normalisation française

La normalisation est le processus permettant d'élaborer une norme à partir des usages et des

meilleures pratiques, elle fournit ainsi des documents de référence destinés à résoudre des problèmes techniques et commerciaux qui se posent de façon répétée entre les partenaires économiques et sociaux. Les normes françaises sont établies par les bureaux de la normalisation ou par l'association française de normalisation qu'on appelle **AFNOR**.

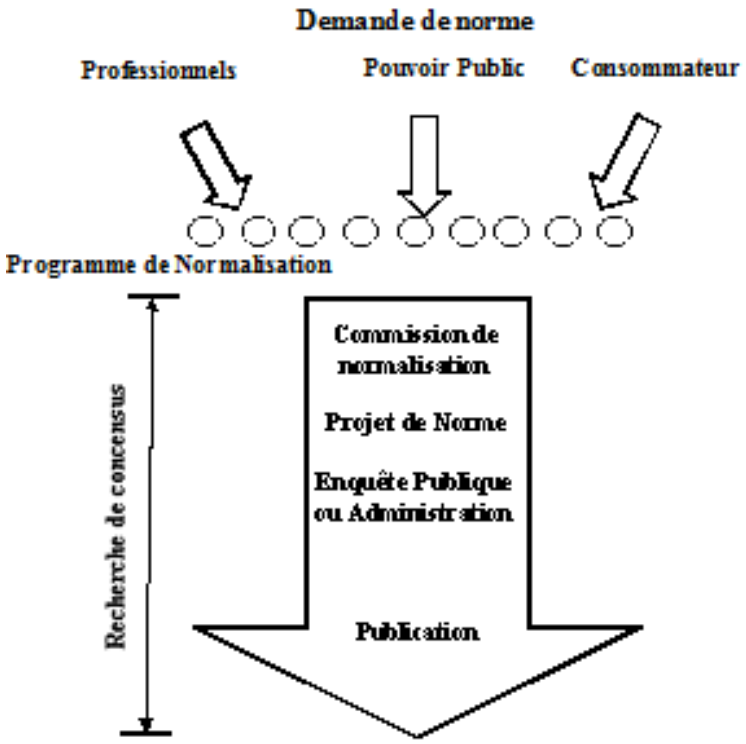
3.2. Pourquoi la normalisation ?

Afin de réduire l'outillage de production et de vérification ainsi que d'accroitre les possibilités d'échange et de compréhension entre les nations qui fut créer en 1928 un comité chargé de fixer des caractéristique dimensionnelles et géométriques des divers ajustements. Cet organisme est appelé ISA (International Standardinzing Association). En 1947 ISA a fait place à ISO (International System Organisation).

3.3. Normes françaises

Le mode d'établissement des normes est constant : il consiste à réunir au sein d'une commission des normalisations sur un problème technique donné. Des représentants de tous les intéressés à sa résolution (utilisateurs, producteurs, distributeurs, personnalités scientifiques et techniques, laboratoires, pouvoirs publics) jusqu'à ce qu'un consensus soit dégagé.

Le processus se schématise de la manière suivante :



II. Système ISO de tolérance

1. Nécessité de la tolérance

Compte tenu du processus de fabrication choisi et des machines utilisées, une cote réelle mesurant l'une de dimensions d'une pièce ne peut être précisément la même que celle indiquée sur le dessin correspondant. S'il faut fabriquer une série des pièces identiques, il est impossible à une même forme, d'avoir toujours exactement la même dimension d'une pièce à l'autre. Autrement dit lors de la fabrication d'une série des pièces identiques il est impossible d'obtenir d'une pièce à une autre exactement la même dimension. Ceci est dû aux imperfections des machines, à l'usure des outils de coupes, à l'opérateur. Il est donc facile de réaliser une pièce si celle-ci peut varier entre deux valeurs limites : **une cote maximale** et **une cote minimale**. L'écart arithmétique ou différence entre ces deux valeurs s'appelle **la tolérance** ou **l'intervalle de tolérance** ou encore **internationale de tolérance IT** et la cote théorique entière entre ces deux cote s'appelle **cote nominale** ou **dimension nominale.**

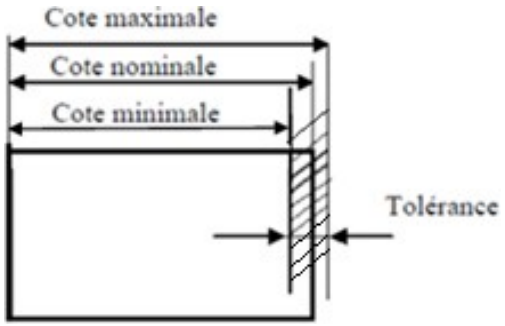


Figure N°1 : Tolérance d'une pièce

2. Système ISO

Il définit un ensemble des tolérances à appliquer aux dimensions des pièces lisses, pour simplifier la tâche on le traitera explicitement qu'aux pièces cylindriques mais ce qui se dit à ces dernières s'applique également à toutes les autres pièces.

Les termes **Alésage** et **arbre** désignent respectivement l'espace contenant et l'espace contenu ou femelle et mâle entre deux faces parallèles d'un système quelconque.

Exemple la largeur d'une rainure et la clavette…

3. Principe

On appelle qu'à la pièce une dimension nominale choisie (ou une cote théorique choisie) et l'on définit chacune de deux dimensions limites par son écart par rapport à cette dernière. Cet écart s'obtient en valeur absolue et en signe en retranchant de la dimension nominale à la dimension considérée.

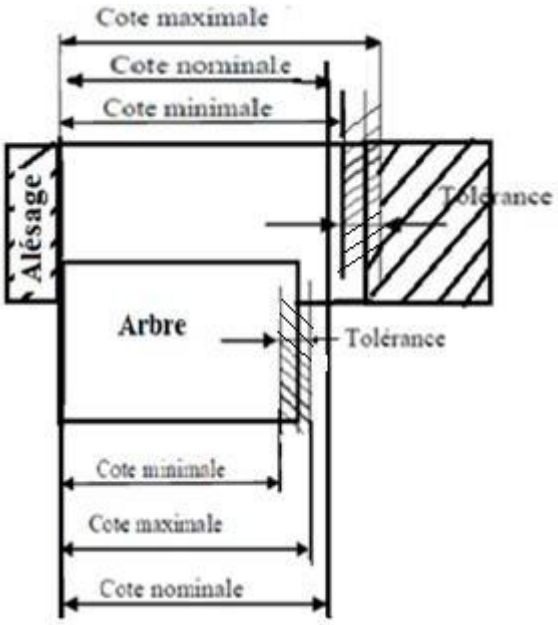


Figure N°2 : Tolérance d'un ajustement

Relations entre les différentes dimensions et les écarts :

Alésage

$$D_{max} = D_{nom} + ES$$
$$D_{min} = D_{nom} + EI$$
$$D_{moy} = D_{max} + D_{min} = D_{nom} + ES + D_{nom} + EI = D_{nom} + \left(\frac{ES + EI}{2}\right)$$

Donc l'intervalle de tolérance se calcule pour l'alésage de la manière suivante :

$$IT_A = D_{max} - D_{min} = D_{nom} + ES - (D_{nom} + EI) = ES - EI$$

Arbre :

$$d_{max} = d_{nom} + es$$
$$d_{min} = d_{nom} + ei$$
$$d_{moy} = d_{max} + d_{min} = d_{nom} + es + d_{nom} + ei = d_{nom} + \left(\frac{es + ei}{2}\right)$$

De la même manière se calcule l'intervalle de tolérance de l'arbre :

$$IT_a = d_{max} - d_{min} = d_{nom} + es - (d_{nom} + ei) = es - ei$$

Exemple : Calculer l'intervalle de tolérance de la pièce suivante : 50^{+11}_{-6}

$$D_{nom} = 50mm$$
Avec : $ES = 11\mu m$
$$EI = -6\mu m$$
$$IT_A = D_{max} - D_{min} = D_{nom} + ES - (D_{nom} + EI) = ES - EI$$
$$AN : IT = 50 + 0{,}011 - (50 - 0{,}006) = 0{,}011 + 0{,}006 = 0{,}0017mm$$

4. Désignation des tolérances

Pour chaque dimension nominale il est prévu une gamme de tolérance, la valeur de cette tolérance est représentée par un chiffre qui indique la qualité de cette tolérance c'est-à-dire la grandeur de l'intervalle de tolérance.

Il existe dix-huit (18) différentes qualités allant de 01-0-1-2-…-16 correspondantes à chacune des tolérances fondamentales qu'on note IT01-IT0-IT1-IT2-…-IT16 fonction de la dimension nominale. La position de cette tolérance par rapport à la ligne d'écart nul ou ligne zéro est symbolisée par une ou deux lettres qui vont de **A** à **Z** pour les alésages et de **a** à **z** pour les arbres ; autrement dit les lettres majuscule et minuscule sont respectivement attribuées au contenant et contenu ou femelle et male.

Exemple : $Ø20\,H7/g6$

Dimension nominale commune

Symbole de tolérance pour l'alésage

Symbole de tolérance pour l'arbre

NB : Dans un ajustement l'alésage est toujours précisé avant l'arbre

5. Position schématisée des tolérances dans le cas des ajustements

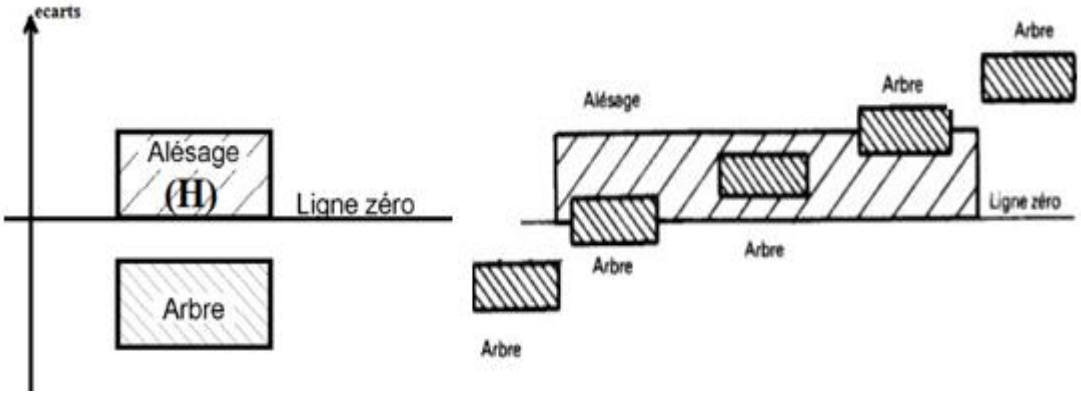
5.1. Système à alésage normal H (EI = 0)

Dans ce système on donnera à la dimension minimale de l'alésage la dimension nominale, et les jeux et serrages sont obtenus à l'aide de l'écart sur l'arbre et les tolérances.

Les alésages sont souvent fabriqués à l'aide d'outils normalisés (forets, alésoir) tandis que les arbres sont fabriqués sur des tours permettant de produire n'importe quel diamètre sur une Plage donnée.

Dans ce système dit normal on a :

- ✓ Une position de l'intervalle de tolérance (IT) de l'alésage fixe qui est **H** c'est-à-dire ***IT = ES*** car ***EI = 0*** donc la dimension minimale est égale à la dimension nominale.
- ✓ Un choix de tolérance de l'arbre qui permet d'obtenir l'ajustement souhaité.



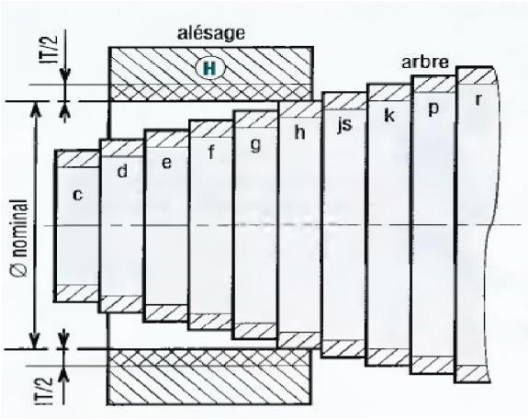


Figure N°3 : Système à alésage normal H

Extraits de tolérances ISO pour alésages (en microns : 1µ = 0.001 mm)

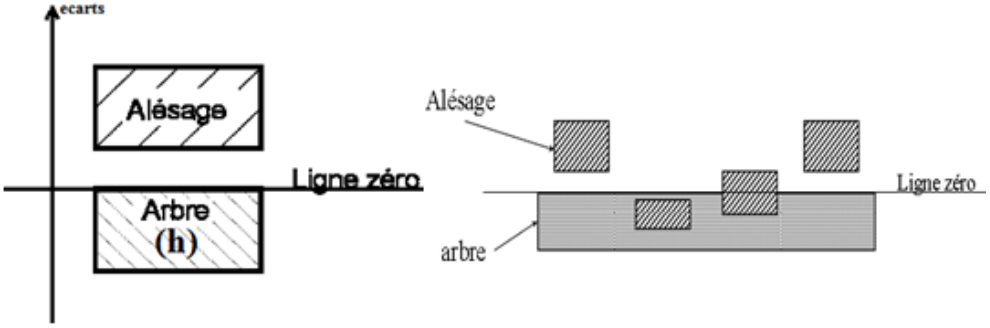
au-delà de		1	3	6	10	18	30	50	80	120	180	250	315	400
à (inclus)		3	6	10	18	30	50	80	120	180	250	315	400	500
H6	ES	+6	+8	+9	+11	+13	+16	+19	+22	+25	+29	+32	+36	+40
	EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H7	ES	+10	+12	+15	+18	+21	+25	+30	+35	+40	+46	+52	+57	+63
	EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H8	ES	+14	+18	+22	+27	+33	+39	+46	+54	+63	+72	+81	+89	+97
	EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5.2. Système à arbre normal (es = 0)

Dans ce système on donnera à la dimension maximale de l'arbre la dimension nominale, et les jeux et serrages sont obtenus à l'aide de l'écart sur l'alésage et les tolérances.

Par exemple lorsqu'un arbre reçoit plusieurs composantes (alésages) avec des ajustements différents et que l'on veut conserver une même tolérance pour toute la portée de l'arbre Dans celui-ci on a :

- ✓ Une position de l'intervalle de tolérance (IT) de l'arbre fixe qui est ***h*** c'est-à-dire ***it = ei*** car ***es = 0*** donc la dimension maximale est égale à la dimension nominale.
- ✓ Un choix de tolérance de l'alésage qui permet d'obtenir l'ajustement souhaité.



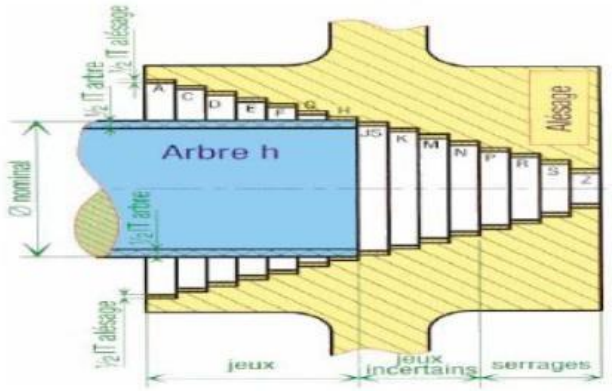


Figure N°4 : Système à arbre normal h

Extraits de tolérances ISO pour arbres (en microns : 1µ = 0.001 mm)

au-delà de / à (inclus)		1 / 3	3 / 6	6 / 10	10 / 18	18 / 30	30 / 50	50 / 80	80 / 120	120 / 180	180 / 250	250 / 315	315 / 400	400 / 500
h6	es	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ei	-6	-8	-9	-11	-13	-16	-19	-22	-25	-29	-32	-36	-40
h7	es	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ei	-10	-12	-15	-18	-21	-25	-30	-35	-40	-46	-52	-57	-63
h8	es	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ei	-14	-18	-22	-27	-33	-39	-46	-54	-63	-72	-81	-89	-97

Définition : Un ajustement est un assemblage dont les deux pièces **contenant** et **contenu** ou **femelle** et **male** ont la même cote théorique ou dimension nominale. Il est désigné par cette cote théorique suivi des symboles relatifs à chacune de deux pièces tout en commençant par l'alésage.

Un assemblage dépend :

- ✓ De la précision d'exécution de chaque pièce (tolérance de fabrication) ;
- ✓ De la position relative de cote extérieure de la pièce femelle par rapport à la pièce male (jeu de fonctionnement).

Exemple : soit l'ajustement suivant : Ø20H7/h6

Ø20H7 est : 20^{+21}_{0}

Pour l'alésage

Ø20h6 est : 20^{0}_{-13} P o ur l'arbre

- ✓ La dimension nominale est la dimension commune à toutes les deux pièces qui le 20 mm ;
- ✓ La dimension maximale est égale à la dimension nominale plus l'écart supérieur dans ce cas précis on a (20 + 0,021) mm pour l'alésage et (20 + 0) mm pour l'arbre ;
- ✓ La dimension minimale est égale à la dimension nominale plus l'écart inferieur dans cet

exemple on a (20 + 0) mm pour l'alésage et (20 – 0,013) mm pour l'arbre.

- ✓ La tolérance de fabrication ou l'intervalle de tolérance est la différence entre deux écarts (supérieur – inférieur) d'une même pièce ici on a (21 – 0) µm pour l'alésage et (0 + 13) µm pour l'arbre.
- ✓ La ligne de zéro ou d'écart nul est le contour de la pièce tracé à la cote nominale.

6. Représentation des tolérances dans le système International ISO

Dans le système international ISO à valeur limite on définit :

- ✓ La tolérance de fabrication ou la qualité ;
- ✓ La position des cotes extérieures de chaque pièce par rapport à la cote nominale.

6.1. Qualité

Plus la qualité augmente plus l'intervalle de tolérance augmente et donc on est moins précis, alors qu'il y a toujours un compromis entre la qualité et le cout de réalisation.

6.2. Position

Une tolérance d'usinage normalisée se représente par un symbole que l'on écrit après le nombre de la cote nominale et qui comprend une lettre (position) suivi d'un chiffre (qualité).

III. Étude des ajustements

Définition:

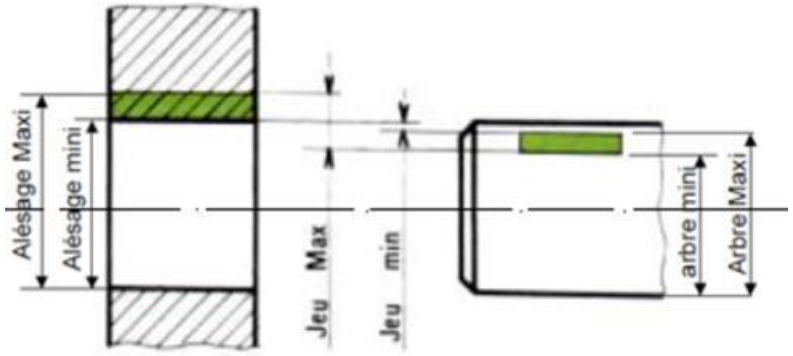
Le terme générique ajustement est utilisé pour désigner le degré de *jeu* ou de *serrage* entre les deux entités géométriques conjuguées, et qui résulte de l'application sur les pièces d'un assemblage (*alésage* et *arbre*) d'une combinaison spécifique de *tolérances et d'écarts fondamentaux*. Les deux éléments ont ***une dimension nominale commune***. Elles ont aussi une interaction fonctionnelle, c'est-à-dire qu'un élément guide, localise ou retient l'autre. Il y a donc contact partiel ou total et occasionnel ou permanent entre les pièces. D'une manière succincte un ajustement est un assemblage de deux pièces contenant et contenu ayant une même cote nominale.

Il existe trois types d'ajustements à savoir :

- ✓ Ajustement avec jeu ;
- ✓ Ajustement avec serrage ;
- ✓ Ajustement incertain.

1. Ajustement avec jeu

Soit un ajustement de dimension nominale **D.** la cote réalisée de l'alésage reste toujours supérieure à celle de l'arbre. Les jeux sont positifs et les intervalles de tolérance de l'alésage et de l'arbre ne se chevauchent pas.



$$J_{\max} = D_{\max} - d_{\min} = D_{nom} + ES - (d_{nom} + ei) = ES - ei$$

$$J_{\min} = D_{\min} - d_{\max} = D_{nom} + EI - (d_{nom} + es) = EI - es$$

$$J_{moy} = \frac{J_{\max} + J_{\min}}{2} = \frac{(ES + EI)}{2} - \frac{(es + ei)}{2}$$

$$IT_A = ES - EI; IT_a = es - ei; IT_{jeu} = IT_A - IT_a = (ES - EI) - (es - ei)$$

Remarque : ici dans ce type d'ajustement la cote minimale de l'alésage est toujours supérieure à la cote maximale de l'arbre, autrement dit l'écart inferieur de l'alésage est toujours supérieur à l'écart maximal de l'arbre donc les deux jeux sont positifs.

Exemple : Soit l'ajustement suivant : Ø40H7/g6

Ø40 est la cote commune à toutes les deux pièces (alésage et arbre), après avoir fait recours aux tableaux des extraits de tolérances on obtient :

Alésage : $Ø40H7 = 40^{+25}_{0}$

Arbre : $Ø40g6 = 40^{-9}_{-25}$

Alors on fait le calcul des jeux afin de déterminer la nature de l'ajustement puis la représentation graphique.

Alésage :

$$D_{max} = D_{nom} + ES = 40 + 0{,}025 = 40{,}025\,mm$$
$$D_{min} = D_{nom} + EI = 40 + 0 = 40\,mm$$

$$D_{moy} = D_{max} + D_{min} = D_{nom} + ES + D_{nom} + EI = D_{nom} + \left(\frac{ES + EI}{2}\right)$$

$$D_{moy} = 40 + \frac{0{,}025 + 0}{2} = 40 + 0{,}0125 = 40{,}0125mm$$

$$IT_A = ES - EI = 25 - 0 = 25\mu m$$

Arbre :

$$d_{max} = d_{nom} + es = 40 - 0{,}009 = 39{,}991\,mm$$
$$d_{min} = d_{nom} + ei = 40 - 0{,}025 = 39{,}975\,mm$$

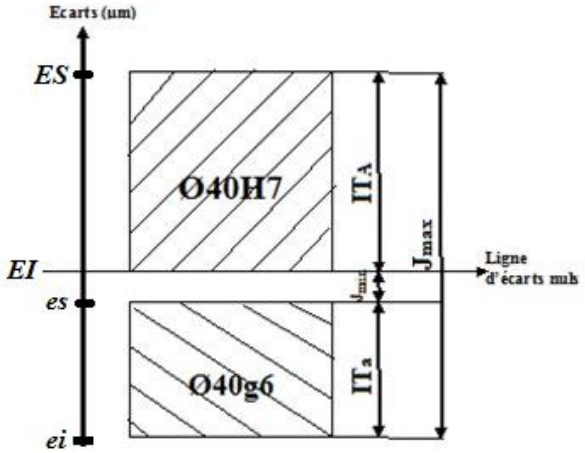
$$d_{moy} = d_{max} + d_{min} = d_{nom} + es + d_{nom} + ei = d_{nom} + \left(\frac{es + ei}{2}\right)$$

$$d_{moy} = 40 + \frac{-0{,}009 - 0{,}025}{2} = 39{,}983mm$$

$$IT_a = es - ei = -9 - (-25) = 16\mu m$$

Pour les deux pièces autrement dit pour l'ajustement on a :

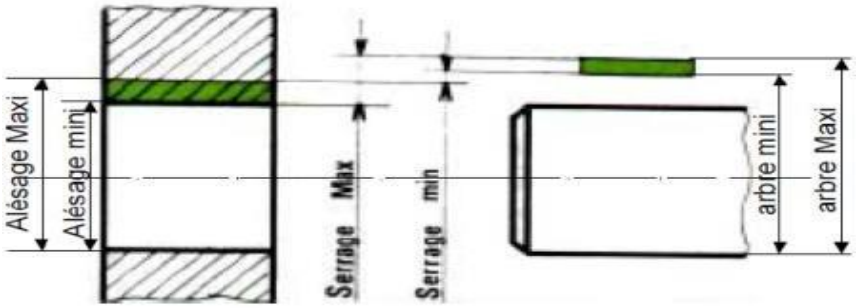
$$J_{max} = D_{max} - d_{min} = D_{nom} + ES - (d_{nom} + ei) = ES - ei = 25 - (-25) = 50\mu m$$
$$J_{min} = D_{min} - d_{max} = D_{nom} + EI - (d_{nom} + es) = EI - es = 0 - (-9) = 9\mu m$$
$$J_{moy} = \frac{J_{max} + J_{min}}{2} = \frac{(ES + EI)}{2} - \frac{(es + ei)}{2} = \frac{50 + 9}{2} = 24{,}5\mu m$$
$$IT_A = ES - EI; IT_a = es - ei$$
$$IT_{jeu} = IT_A + IT_a = (ES - EI) + (es - ei) = 25 + 16 = 41\mu m$$



Représentation graphique d'un ajustement avec jeu

2. Ajustement avec serrage

Le serrage peut être considéré comme un jeu négatif. La cote maximale de l'alésage est toujours inferieure à la cote minimale de l'arbre.



$$S_{min} = J_{max} = D_{max} - d_{min} = D_{nom} + ES - (d_{nom} + ei) = ES - ei \le 0$$
$$S_{max} = J_{min} = D_{min} - d_{max} = D_{nom} + EI - (d_{nom} + es) = EI - es \le 0$$
$$J_{moy} = \frac{J_{max} + J_{min}}{2} = \frac{(ES + EI)}{2} - \frac{(es + ei)}{2} \le 0$$
$$IT_A = ES - EI; IT_a = es - ei$$
$$IT_{jeu} = IT_A - IT_a = (ES - EI) - (es - ei)$$

Remarque : Dans ce type d'ajustement les cotes minimale et maximale de l'alésage sont toujours inférieures à celles de l'arbre c'est-à-dire les écarts de l'alésage sont inférieurs à ceux de l'arbre, d'où les deux jeux sont négatifs ils sont dits serrages.

Exemple : Soit l'ajustement suivant : Ø40H7/p6

Ø40 est la cote commune à toutes les deux pièces (alésage et arbre), après avoir fait recours aux tableaux des extraits de tolérances on obtient :

Alésage : $Ø40H7 = 40^{+25}_{0}$

Arbre : $Ø40p6 = 40^{+42}_{+26}$

Alors on fait le calcul des jeux afin de déterminer la nature de l'ajustement puis la représentation graphique de l'ajustement.

Alésage :

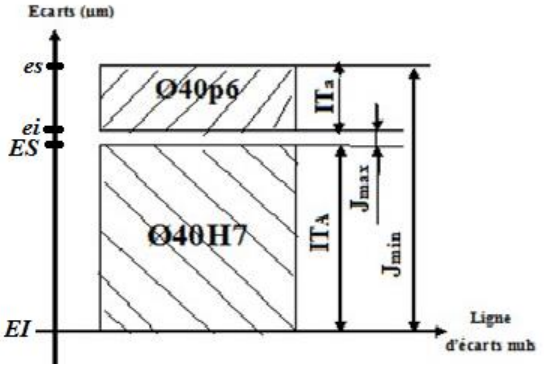
$$D_{max} = D_{nom} + ES = 40 + 0{,}025 = 40{,}025\,mm$$
$$D_{min} = D_{nom} + EI = 40 + 0 = 40\,mm$$
$$D_{moy} = D_{max} + D_{min} = D_{nom} + ES + D_{nom} + EI = D_{nom} + \left(\frac{ES + EI}{2}\right)$$
$$D_{moy} = 40 + \frac{0{,}025 + 0}{2} = 40 + 0{,}0125 = 40{,}0125mm$$
$$IT_A = ES - EI = 25 - 0 = 25\mu m$$

Arbre :

$$d_{max} = d_{nom} + es = 40 + 0{,}042 = 40{,}042\,mm$$
$$d_{min} = d_{nom} + ei = 40 + 0{,}026 = 40{,}026\,mm$$
$$d_{moy} = d_{max} + d_{min} = d_{nom} + es + d_{nom} + ei = d_{nom} + \left(\frac{es + ei}{2}\right)$$
$$d_{moy} = 40 + \frac{0{,}042 + 0{,}026}{2} = 40{,}034mm$$
$$IT_a = es - ei = 42 - 26 = 16\mu m$$

Pour les deux pièces autrement dit pour l'ajustement on a :

$$S_{min} = J_{max} = D_{max} - d_{min} = D_{nom} + ES - (d_{nom} + ei) = ES - ei = 25 - 26 = -1\mu m$$
$$S_{max} = J_{min} = D_{min} - d_{max} = D_{nom} + EI - (d_{nom} + es) = EI - es = 0 - 42 = -42\mu m$$
$$J_{moy} = \frac{J_{max} + J_{min}}{2} = \frac{(ES + EI)}{2} - \frac{(es + ei)}{2} = \frac{-1 - 42}{2} = -21{,}5\mu m$$
$$IT_A = ES - EI; IT_a = es - ei$$
$$IT_{jeu} = IT_A + IT_a = (ES - EI) + (es - ei) = 25 + 16 = 41\mu m$$

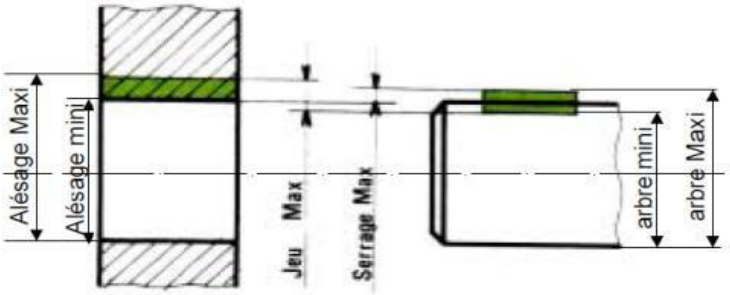


Représentation graphique d'un ajustement avec serrage

3. Ajustement incertain

L'ajustement incertain aboutit à jeu ou à un serrage. Les intervalles de tolérance se chevauchent.

Remarque : Ce type d'ajustement donne des jeux qui ont de signe contraire, soit le jeu maximal est négatif et le jeu minimal est positif ou le cas contraire. Il est intéressant dans ce cas de voir la prédominance de serrage ou du jeu afin d'obtenir un ajustement avec jeu ou un ajustement avec serrage.



Exemple : Considérons l'ajustement suivant : Ø40H7/n6

Ø40 est la cote commune à toutes les deux pièces (alésage et arbre), après avoir fait recourt aux tableaux des extraits de tolérances des arbres et des alésages on a :

Alésage : $\text{Ø40H7} = 40^{+25}_{0}$

Arbre : $\text{Ø40n6} = 40^{+33}_{+17}$

Alors on fait le calcul des jeux afin de déterminer la nature de l'ajustement puis la représentation graphique de l'ajustement.

Alésage :

$$D_{max} = D_{nom} + ES = 40 + 0{,}025 = 40{,}025\,\text{mm}$$

$$D_{min} = D_{nom} + EI = 40 + 0 = 40\,\text{mm}$$

$$D_{moy} = D_{max} + D_{min} = D_{nom} + ES + D_{nom} + EI = D_{nom} + \left(\frac{ES + EI}{2}\right)$$

$$D_{moy} = 40 + \frac{0,025 + 0}{2} = 40 + 0,0125 = 40,0125mm$$

$$IT_A = ES - EI = 25 - 0 = 25\mu m$$

Arbre :

$$d_{max} = d_{nom} + es = 40 + 0,033 = 40,033\,mm$$
$$d_{min} = d_{nom} + ei = 40 + 0,033 = 40,017\,mm$$

$$d_{moy} = d_{max} + d_{min} = d_{nom} + es + d_{nom} + ei = d_{nom} + \left(\frac{es + ei}{2}\right)$$

$$IT_a = es - ei = 33 - 17 = 16\mu m$$

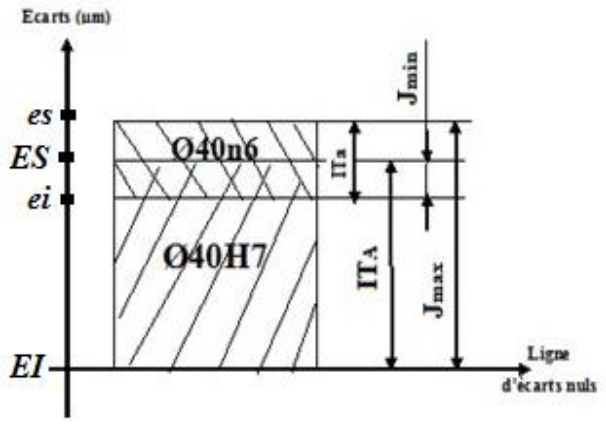
$$d_{moy} = 40 + \frac{0,033 + 0,017}{2} = 40,025mm$$

Pour les deux pièces autrement dit pour l'ajustement on a :

$$J_{max} = D_{max} - d_{min} = D_{nom} + ES - (d_{nom} + ei) = ES - ei = 25 - 17 = 8\mu m \geq 0$$
$$J_{min} = D_{min} - d_{max} = D_{nom} + EI - (d_{nom} + es) = EI - es = 0 - 33 = -33\mu m \leq 0$$
$$J_{moy} = \frac{J_{max} + J_{min}}{2} = \frac{(ES + EI)}{2} - \frac{(es + ei)}{2} = \frac{8 - 33}{2} = -12,5\mu m$$
$$IT_A = ES - EI; IT_a = es - ei$$
$$IT_{jeu} = IT_A + IT_a = (ES - EI) + (es - ei) = 25 + 16 = 41\mu m$$

Alors on fait le calcul des jeux afin de déterminer la nature de l'ajustement puis la représentation graphique.

On remarque que cet ajustement a une prédominance serrage, vue aussi la position de l'arbre on est très proche d'un serrage que d'un jeu.



Représentation graphique d'un ajustement incertain

4. Caractéristiques des ajustements

On distingue trois principales caractéristiques d'un ajustement qui sont :

- ✓ Qualité ;

- ✓ Zone de tolérance ;
- ✓ Palier de diamètre.

4.1. Qualité

Elle est la précision indiquée par un nombre de (1 à 16) auquel correspond la tolérance en fonction de la dimension nominale, autrement dit elle est le compromis entre la production et le cout.

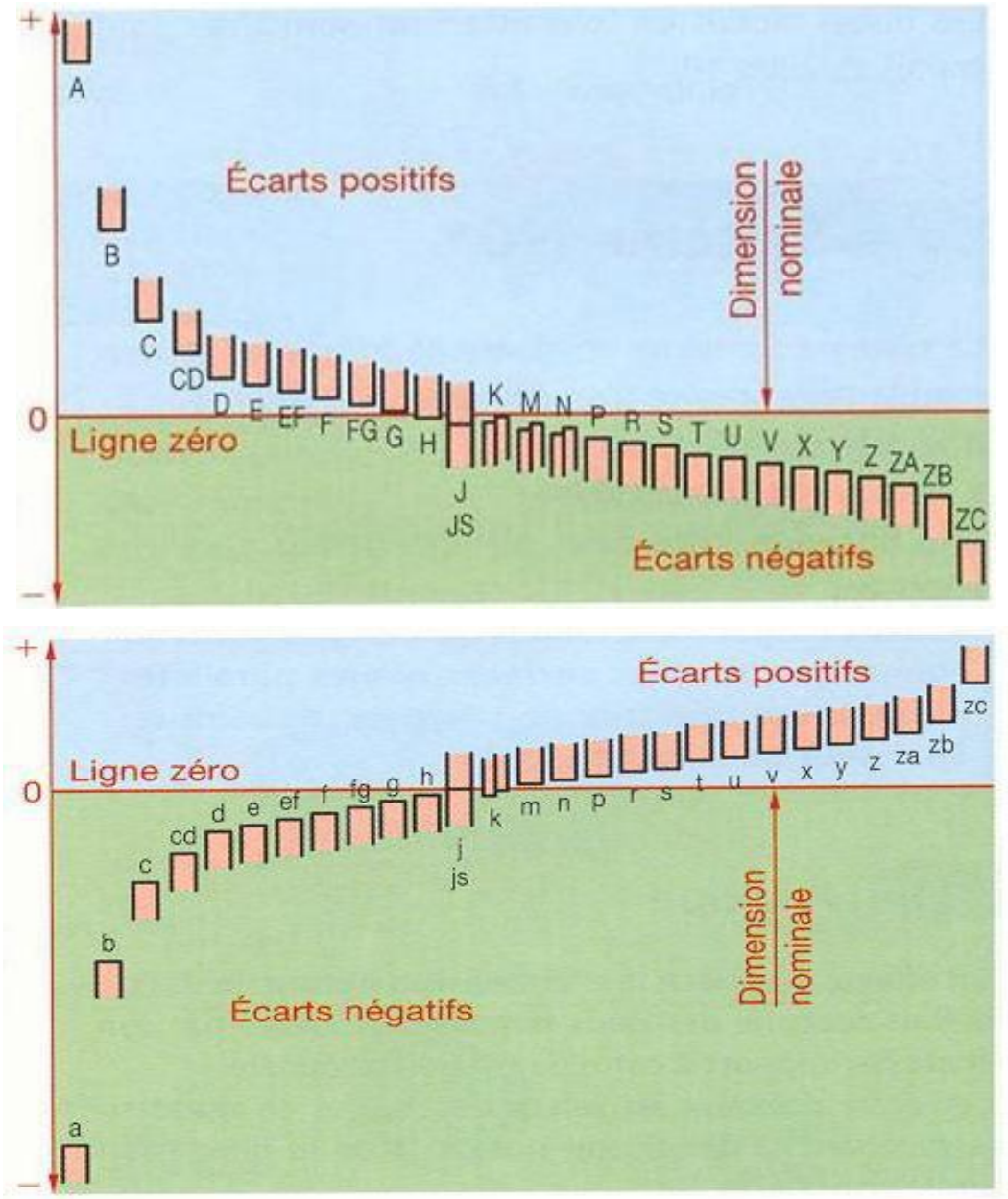
Qualités usuelles indicatives des principaux procédés d'usinage																
IT (qualités)	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Oxycoupage																
Sciage																
Rabotage																
Perçage																
Fraisage																
Perçage + alésoir																
Alésage																
Brochage																
Tournage																
Rectification																
Rodage																
Superfinition																

Usinage de la qualité : **Moyenne** **Précise** **Très précise**

4.2. Zone de tolérance

Cette zone sert à fixer la position de la tolérance par rapport à la cote nominale ou la ligne de zéro et détermine la grandeur du jeu ou de serrage d'un ajustement considéré. Elle n'intéresse que les arbres car la tolérance des alésages normaux est obligatoirement située au-dessus de la tangente à la cote nominale ou bien on peut dire qu'elle ne s'intéresse qu'aux alésages car la tolérance des arbres normaux est obligatoirement située en dessous de la tangente à la cote nominale.

Position schématisée des tolérances des alésages et des arbres



4.3. Palier de diamètre

Pour une précision déterminée, la tolérance grandie en fonction de la cote nominale, cependant sans cette dernière lui être proportionnelle. Afin de simplifier l'établissement des tables de tolérance on a regroupé dans chaque palier des diamètres voisins (proches). Le système à alésages normaux reconnait treize (13) paliers de diamètres pour les cotes allant de un à cinq cent (1 à 500) non inclus, alors il existe une tolérance pour chaque palier des diamètres. Par exemple le diamètre 150 contenu dans le palier de diamètre 120 à 180 comporte pour la qualité 9 un intervalle de tolérance de 100 micromètres.

En fabrication mécanique les intervalles de tolérance compris entre **IT5** et **IT13** sont les couramment utilisés.

Principales qualités ou tolérances (IT) ISO
(IT en micromètre : 1µm = 0.001 mm)

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

5. Choix des tolérances d'ajustement

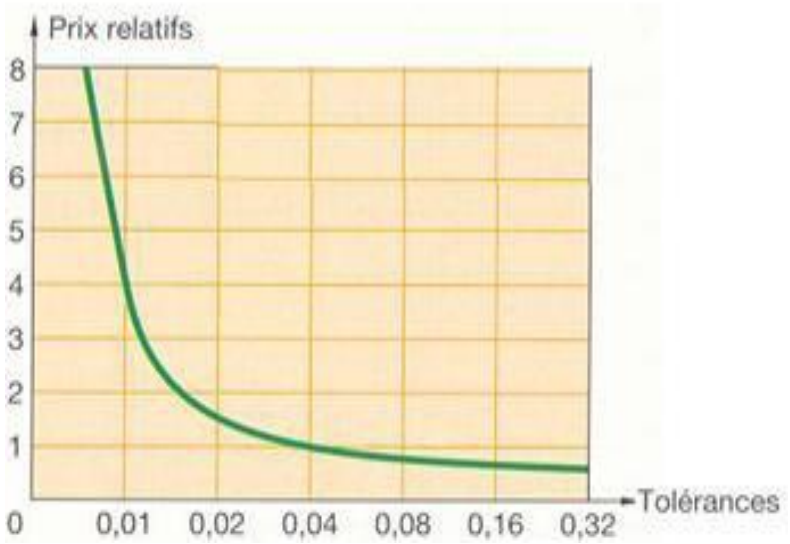
Le choix des ajustements est une étape importante dans la conception des machines. Les performances et la qualité en dépendent.

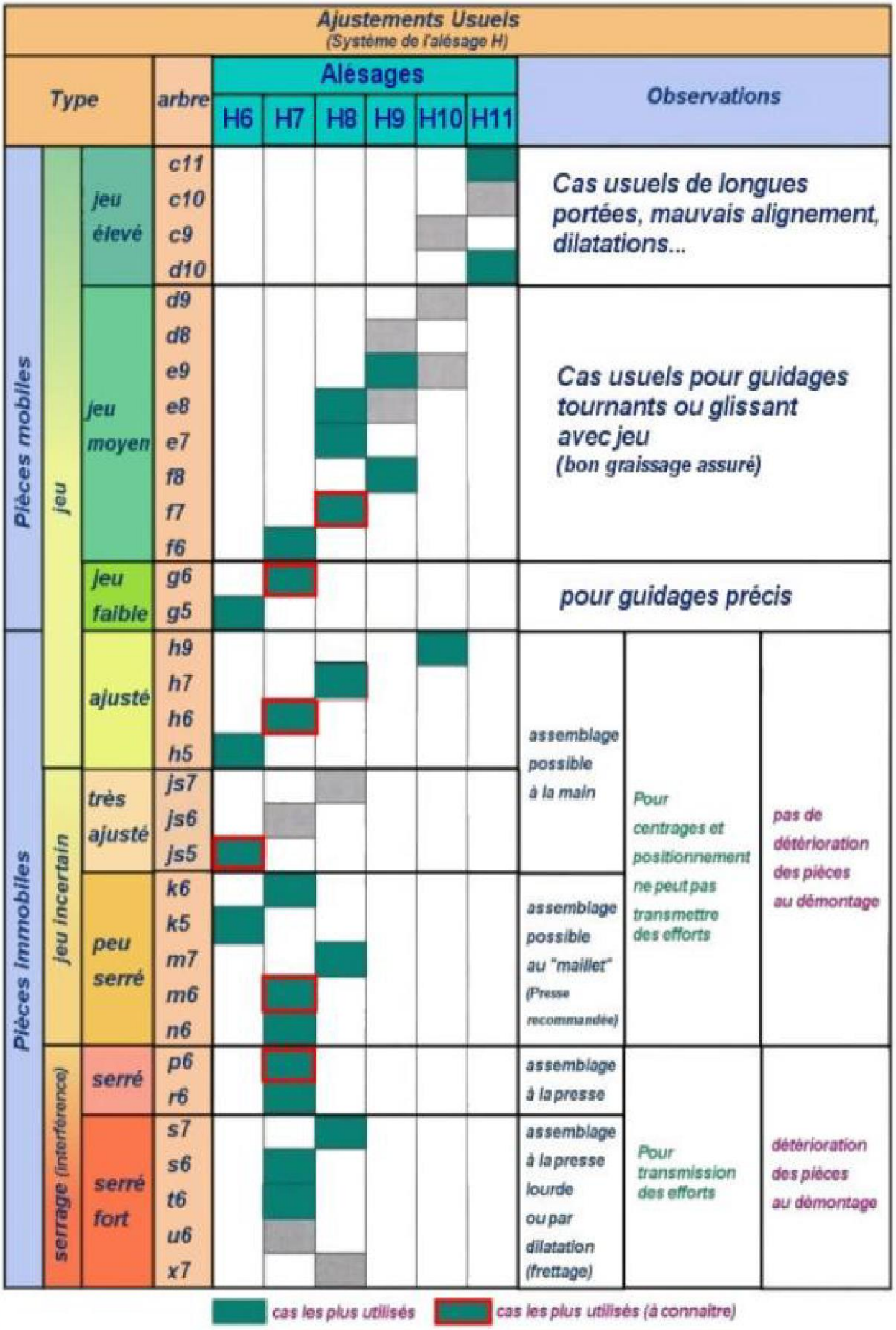
Méthode générale :

a. On détermine les jeux ou les serrages limites compatibles avec un fonctionnement correct (éviter tout excès de précision inutile voir diagramme ci-après).

b. On se limite à maintenir le système à alésage normal puis en variant l'arbre afin d'obtenir les différents types d'ajustements. Tous les choix (jeux et serrages) sont regroupés dans le tableau ci-après.

c. On choisit dans les normes et de préférence les cas les plus couramment utilisés qui sont aussi regroupés dans le même tableau.




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

OBSERVATIONS SUR LES PRINCIPAUX AJUSTEMENTS				Arbres*	H 6	H 7	H8	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	
				js	5	6			
			Mise en place au maillet	k	5				
				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		

Extrait des tolérances des Alésages

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

Extrait des tolérances des arbres

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

Exemple :

✓ Dans le tableau ci-dessus on a l'ajustement **H8/f7** fait partie des pièces mobiles assurant un bon graissage et permettant un bon guidage tournant. C'est un des cas les plus utilisés à connaitre, par contre **H7/f6** fait partie des pièces mobiles assurant un bon graissage et permettant un bon guidage tournant mais c'est un des cas les plus utilisés tout court.

✓ Dans le même tableau l'ajustement **H7/p6** est un cas plus utilisé à connaitre pour transmission des efforts, l'assemblage nécessite une presse lourde, cependant **H7/r6** est un cas plus utilisé pour transmission des efforts, l'assemblage nécessite une presse lourde mais pas à connaitre.

6. Normalisation des tolérances

La norme **NE-02-101** présente des formules mathématiques et donne l'intervalle de tolérance en fonction du diamètre nominal et d'un indice de qualité k.

$$\mathrm{IT}(\mu\mathrm{m}) = (0{,}45\times\sqrt[3]{D} + 0{,}001\times D)\times k$$

L'indice de qualité k est lié aux qualités, pour les qualités allant de 5 à 11 que nous regroupons dans le tableau ci-dessous.

Qualités	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
Indices k	**7**	**10**	**16**	**25**	**40**	**64**	**100**

Exemple : Calculons l'intervalle de tolérance pour une cote théorique de 125, sachant que la qualité 8 est souhaitée et la valeur de l'indice associé à cette qualité est égale à 25.

$\mathrm{IT}(\mu\mathrm{m}) = (0{,}45\times\sqrt[3]{D} + 0{,}001\times D)\times k$

AN : $\mathrm{IT}(\mu\mathrm{m}) = (0{,}45\times\sqrt[3]{125} + 0{,}001\times 125)\times 25 = 59{,}375$

Alors que la norme **NFE-02-101** indique dans le tableau une valeur de 63 µm de l'intervalle de tolérance pour le diamètre 125 qui appartenant au palier de diamètre 120 exclus à 180 inclus et non 59,375 µm.

Cette différence provient que le diamètre 125 mm qui appartient au palier de diamètre 120 exclus à 180 inclus est très proche à la borne inférieure du palier, c'est-à-dire des valeurs exclues. Par convention on fait recours à la formule suivante pour calculer l'intervalle de tolérance d'un palier dans lequel figure le diamètre.

$\mathrm{D} = \sqrt{D_1\times D_2}$ où $D_1 \le D \le D_2$

Alors dans cet exemple on trouve une nouvelle valeur qui est : $\mathrm{D} = \sqrt{120\times 180} = 146{,}969mm$

En reprenant le calcul précédant et en remplaçant le diamètre 125 par le diamètre 146,969 on

trouve une valeur de 63 µm pour l'intervalle de tolérance.

Remarque : Au-delà de diamètre 500 mm la formule précédente des intervalles de tolérance n'est plus applicable, on fait recourt à la formule suivante :

$$IT(\mu m) = (2{,}1 + 0{,}004 \times D) \times k$$

7. Application

Soit les ajustements suivants :

1. 60H7/p6
2. 80H7/n6
3. 50H7/g6

a. Calculer les dimensions de ces ajustements.

b. Calculer les intervalles de tolérances.

c. Calculer les jeux

d. Donner est la nature de chacun d'eux

IV. Matériaux utilisés en construction mécanique

1. Introduction

Les matériaux sont à la source de la technologie et du monde industriel. La réussite technique et le succès commercial d'un produit fabriqué dépendent en grande partie des matériaux choisis. Pour ce faire la fabrication mécanique a pour but de confectionner (fabriquer, préparer) maintenir en état tout mécanisme courant. La fabrication du mécanisme consiste à transformer des matériaux reçus dans une forme de produit brut. Les pièces une fois réalisées réunies et assemblées entre elles pour constituer le mécanisme prévu.

Le choix dépend autant du prix que des qualités propres du matériau et du procédé de fabrication retenu pour la réalisation. La sélection est le plus souvent effectuée en équipe client et concepteur étant associés aux techniciens de fabrications.

Le choix d'un matériau dépend de plusieurs critères ou caractéristiques qui sont :

- ✓ Caractéristiques mécaniques (limite élastique, dureté…) ;
- ✓ Caractéristiques physico-chimiques (corrosion, vieillissement…) ;
- ✓ Caractéristiques économiques (prix, disponibilité…).

Ces critères n'appartiennent pas au mécanicien mais il doit prendre des précautions nécessaires lors de sa transformation.

2. Classification des matériaux

On peut regrouper en famille les matériaux et dans une même famille il est nécessaire de repartir en groupe :

- ➢ Les matériaux métalliques : cette famille des matériaux est constituée de deux groupes à savoir les **ferreux** et les **non ferreux.**
  - Les matériaux ferreux à leur tour sont constitués des aciers alliés, aciers non alliés et les fontes ;
  - Les matériaux non ferreux prennent en compte l'aluminium et ses alliés puis le cuivre et ses alliés.
- ➢ Les polymères sont également repartis en deux groupes :
  - Les polymères naturels sont entre autre les bois et les caoutchoucs ;
  - Les polymères synthétiques sont les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.
- ➢ Les céramiques

Elles sont également en trois classes qui sont :

- La céramique domestique ;

- La céramique technique ;
- La céramique d'art.

➢ Les composites sont aussi répartis comme suit :

- Les fibres de carbone ;
- Les fibres d'aramide ;
- Les fibres de verre.

2.1. Matériaux métalliques

2.1.1. Métaux ferreux

2.1.1.1. Aciers

Définition : Les aciers sont des alliages de fer et de carbone éventuellement avec des éléments d'addition dont le pourcentage en carbone est inférieur à 2%. Ce pourcentage va de 0,05 à 1.8% environ.

Obtention des aciers

On peut obtenir des aciers à partir de la fonte de première fusion, celle-ci est conduite dans le mélangeur et subie des transformations qui conduisent à l'élaboration des différents aciers qu'on essayera de classer de la manière suivante :

✓ Les aciers de la classe **A** et **E** : ils sont obtenus après avoir carburé la fonte et au passage l'oxygène appelés aussi des ***aciers thomas.***

✓ Les aciers de classes **XC** : sont obtenus après avoir récupéré les ferrailles et passé dans le four Martin (Pierre-Émile Martin fait fondre l'acier en 1864 dans le four de son père) la fusion de la fonte. Ces deux classes donnent à leur tour :

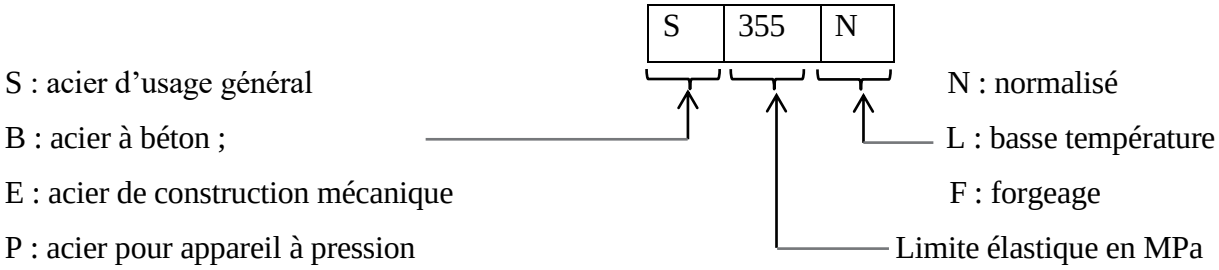
- Une coulée de l'acier en lingotière (moule de lingot) ;
- Une coulée continue après le tronçonnage donne des demi-produits entre autre des brames (tôles) et de bloom (barre d'acier de section rectangulaire).

❖ ***Les aciers non alliés :***

Les aciers non alliés d'usage général **S** et les aciers de construction mécanique **E** sont les plus utilisés caractérisés par leur faible teneur en carbone. Il existe dans des qualités diverses et variées, la plupart sont disponibles sous la forme laminée marchande (profilés, barre, tôle ...) aux dimensions normalisées.

Désignation :

La lettre (S ou E) suivie de la limite élastique à la traction Re en méga pascal ou en Newton par millimètre carrée (MPa ou N/mm^2) éventuellement quelques indications complémentaires.



- ***Les aciers alliés :***

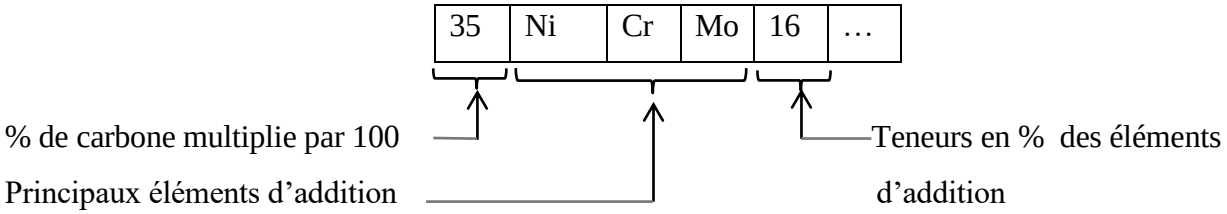
Ils divisent en deux catégories à savoir : les faiblement alliés et les fortement alliés.

- ***Les aciers faiblement alliés*** :

Aucun élément d'addition n'atteint la teneur de 5% en masse ; ils sont choisis chaque fois qu'une haute résistance est exigée

Désignation :

Elle est fonction de la composition de pourcentage de carbone multiplié par 100 suivi des symboles chimiques des principaux éléments d'addition classés en ordre décroissant.



NB : certains éléments sont multipliés par 4 ; 10 ; 100 et 1000 qu'on regroupe dans le tableau ci-dessous.

X4	**X10**		**X100**	**X1000**
Chrome(Cr)	Aluminium (Al)	Tantale (Ta)	Azote (N)	Bore (B)
Cobalt (Co)	Cuivre (Cu)	Titane (Ti)	Phosphore (P)	
Nickel (NI)	Béryllium(Be)	Vanadium (V)	Souffre (S)	
Silicium (Si)	Molybdène (Mo)	Zirconium (Zr)		
Tungstène (W)	Niobium (Nb)			
Manganèse (Mn)	Plomb (Pb)			

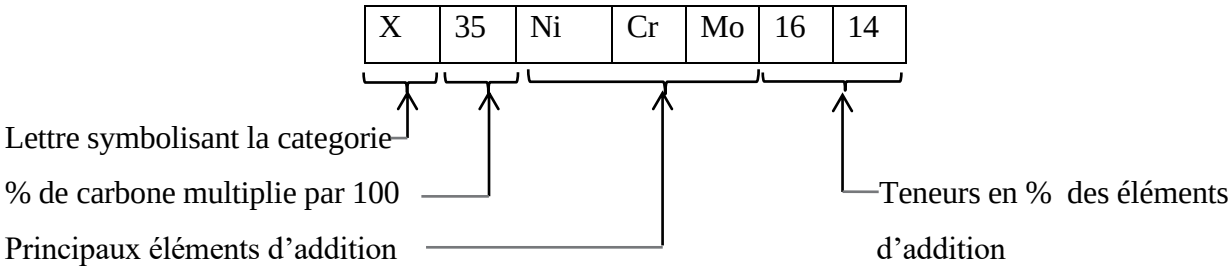
- ***Les aciers fortement alliés :***

Pour ces aciers au moins un élément d'addition dépasse la teneur de 5% en masse, ils sont destinés à des usages particuliers (en oxydation dans un milieu humide).

Désignation :

La lettre X (dans certains documents on utilise la lettre Z) symbolisant la famille suivie des

mêmes indications que pour les aciers faiblement alliés ; la seule différence qui apparait est au niveau du multiplicateur pour le pourcentage des éléments d'addition.



2.1.12. Fontes

Les fontes sont des alliages ferreux, leur grande coulabilité permet d'obtenir des pièces de fonderie aux formes complexes. A cause du pourcentage élevé en carbone entre 2 et 4,5%, les fontes sont en général fragiles, peu ductiles (inadaptées aux déformations à froid) difficilement soudables.

On distingue deux grandes catégories des fontes : les fontes de la première fusion et les fontes de la deuxième fusion.

- ✓ Les fontes de la première fusion élaborées dans des hauts fourneaux contenant les :
  - Fontes de moulage destinées à la fabrication des pièces moulées;
  - Fontes d'affinage pour le four Martin ;
  - Fontes spéciales ou les ferro-alliages riches en manganèse et en silicium.
- ✓ Les fontes de la deuxième fusion élaborées au cubilot (four à cuve) comprennent :
  - Les fontes mécaniques ordinaires ou fontes grises : ce sont les plus économiques et les plus utilisées. Le moulage des dernières est par excellence ; on les appelle aussi des fontes à graphite lamellaire à cause de la présentation de carbone sous formes des fines lamelles de graphite.

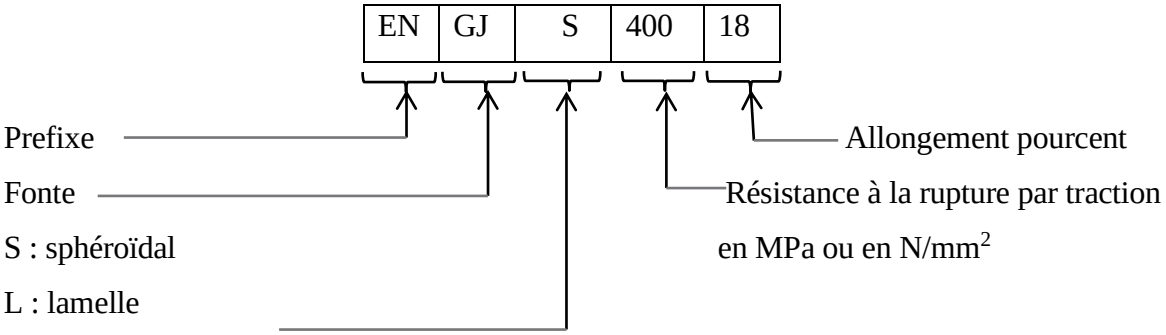
Propriété : bonne coulabilité, bonne usinabilité et grande résistance en compression.

- Les fontes blanches : à base de perlite et de cémentite (FeC) destinées à fabriquer des pièces moulées, elles sont très dures mais fragiles, elles résistent aux frottements et aux températures élevées et font partie des fontes malléables.
- Les fontes à graphite sphéroïdal : sont obtenues par addition des petites quantités de magnésium juste avant le moulage. Le graphite s'agglomère pendant le traitement sous forme des nodules ou des sphères.

Propriété : ductilité, usinabilité, résilience.

Application : vilebrequin, arbre de transmission…

Désignation :



2.1.2. Métaux non ferreux

2.1.2.1. Aluminium et ses alliages

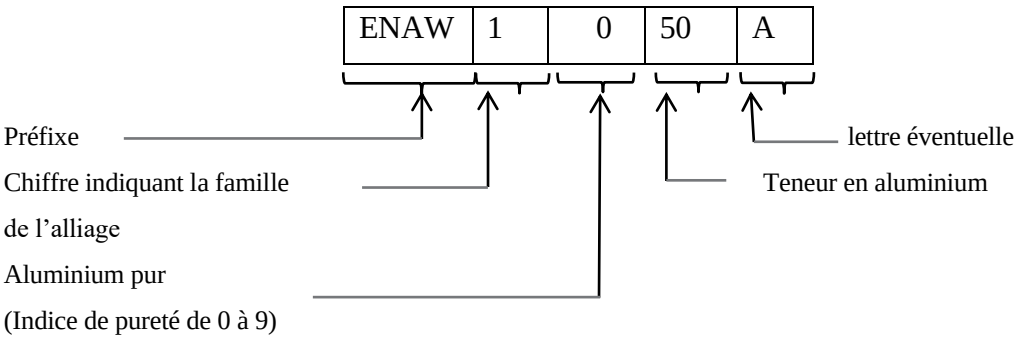
Fabriqué industriellement depuis 1886, l'aluminium est obtenu à partir des minerais de bauxite et de cryolithe, ce sont les plus utilisés après les aciers et les fontes.

Principales caractéristiques

- Point le plus bas de sa fusion est de 658°C ;
- Densité assez légère (2,7) ;
- Bonne conductivité électrique ;
- Faible résistivité électrique 0,026 μ.Ω.m à 20°C ;
- Bonne conductibilité thermique de 237 W/m.K ;
- Résistance mécanique faible, ductile facile à usiner, résistant à la corrosion.

Utilisation : dans le domaine d'aéronautique à cause de sa faible densité…

Désignation :



1- Aluminium pur (teneur > 99%)	**5- Al + Mn**
2- Al + Cu	**6- Al + Si + Mn**
3- Al + Mg	**7-Al + Zn**
4- Al + Si	**8- Al + autres**

2.1.2.2. Cuivre et ses alliages

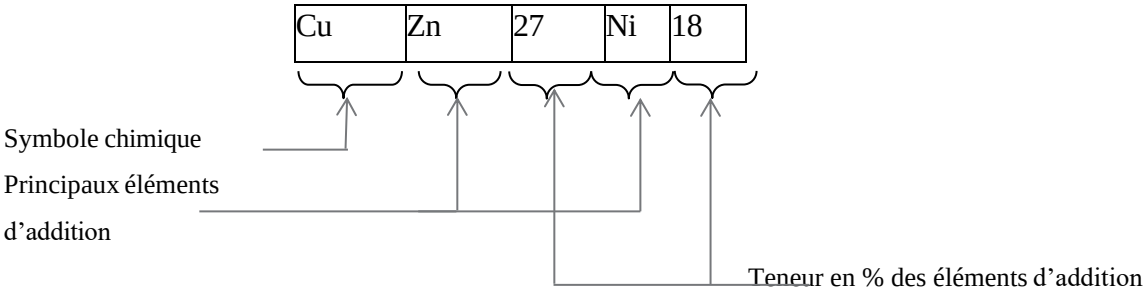
Les alliages de cuivre sont très nombreux (plus de 200 alliages).

Les principales familles sont les laitons (Cu + Zn), les bronzes (Cu + Sn), les cupronickels (Cu + Ni) et les cupro-aluminiums (Cu + Al).

Les principales caractéristiques :

- Plus lourd que l'acier de densité 8,9 ;
- Température de fusion 1083° ;
- Grande résistance à la corrosion ;
- Plasticité ou ductilité élevée (A% jusqu'à 500) ;
- Grande conductivité.

Désignation :



Domaine d'application :

- Fabrication des pièces de monnaie ;
- Coussinets ;
- Visserie-boulonnerie ;
- Engrenage…

2.2. Polymères ou matières plastiques

Les matières plastiques sont produites essentiellement à partir du pétrole, l'un des symboles du xx^{e} siècle et sont aussi présentes partout. Les polymères sont élaborés par synthèse chimique à partir des molécules de base appelées monomères. Ces derniers sont construits autour des atomes de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O), d'azote (N) etc. mais leur constituant de base est la résine à laquelle on associe des adjuvants et des additifs.

Du fait de leur faible densité (0,9 à 2,2) bénéficient de très nombreux atouts (bonne isolation, bon rapport volume/prix…) mais parfois inflammables.

On distingue les homopolymères, répétition d'une unique structure moléculaire et les copolymères, répétition de plusieurs structures différentes.

2.2.1. Thermoplastiques

C'est la famille la plus utilisée. Les thermoplastiques représentent près de 80% des applications des matières plastiques. Ils se ramollissent et se déforment sous l'action de la chaleur.

Ils sont constitués de chaînes ramifiées, ont un point de fusion et comportent deux classes : Les amorphes, sans ordre moléculaire, et les cristallins. Le changement d'état solide-liquide ou pâteux peut se faire plusieurs fois avec une perte de caractéristiques à chaque cycle.

Domaine d'application :

Ils sont utilisés dans le transport, la mécanique, le textile…

Ils sont insensibles à l'humidité, aux parasite mais leur coefficient de dilatation est élevé (fluage élevée).

Exemple : les ABS, le Polypropylène (pp)...

2.2.2. Thermodurcissables

Ils ne se ramollissent pas et ne se déforment pas sous l'action de la chaleur, une fois crées il n'est plus possible de les redémolir par chauffage.

Les thermodurcissables présentent une bonne tenue aux températures élevées (T > 200°), aux attaques chimiques et une meilleure résistance au fluage. Leurs macromolécules orientées dans l'espace suivant les trois directions. Il n'y a pas de point de fusion. La mise en œuvre est moins pratique, ils ne représentent que 20% des plastiques.

2.2.3. Élastomères ou caoutchoucs

Ils sont obtenus par synthèse chimique et possèdent des propriétés comparables à celles des thermoplastiques. Le premier caoutchouc naturel est le néoprène (apparu en 1930 c'est un thermoplastique une famille de caoutchouc à base de polychloroprène de formule CH_2=CH-CCl=CH_2). Ils sont caractérisés par une grande élasticité l'allongement pourcent peut aller jusqu'à 1000%.

Domaine d'application : rependu dans le pneumatique, revêtements, joint d'étanchéité divers…

2.3. Céramiques

Les céramiques ne sont ni métalliques, ni organiques, à la température ambiante elles sont solides. Les objets en céramique sont réalisés par solidification à haute température d'une pâte humide plastique (verres minéraux), ou par frittage d'une poudre sèche préalablement comprimée, sans passer par une phase liquide. Elles sont très dures, très rigides, résistent à la chaleur, à l'usure, aux agents chimiques et à la corrosion mais sont fragiles.

On peut distinguer trois catégories de céramique :

✓ La céramique domestique, principalement la poterie, l'une des plus anciennes formes de céramique, antérieure au travail des métaux, qui utilise les terres argileuses comme matériau de base ;

✓ La céramique technique, particulièrement développée au XX^{e} siècle, et qui utilise des matériaux à base d'oxydes, de carbures (outil de coupe)...

✓ La céramique d'art, qui délaisse la fonction utilitaire pour se centrer sur la valeur décorative ou esthétique.

2.4. Matériaux composites

Ils sont composés d'un matériau de base (matrice ou liant) renforcé par des fibres, ou agrégats, d'un autre matériau. En renfort, on utilise :

✓ Les fibres de verre qui ont une bonne adhésion avec tous types de résines et des propriétés moyennes (économique),

✓ les fibres de carbone qui ont une excellente propriété mécanique mais le prix est élevé ;

✓ Les fibres d'aramide ont une bonne résistance aux chocs et à la fatigue mais une faible densité.

Éléments d'addition	**Symbole métallique**	**Symbole chimique**
Aluminium	**A**	**Al**
Bore	**B**	**B**
Cobalt	**K**	**Co**
Chrome	**C**	**Cr**
Cuivre	**U**	**Cu**
Manganèse	**M**	**Mn**
Molybdène	**D**	**Mo**
Niobium	**Nb**	**Nb**
Nickel	**N**	**Ni**
Plomb	**Pb**	**Pb**
Silicium	**S**	**SI**
Soufre	**F**	**S**
Titane	**Ti**	**Ti**
Tungstène	**W**	**W**
Vanadium	**V**	**V**

V. Essais des matériaux.

1. But des essais

Les organes qui constituent les machines, les constructions civiles, les ouvrages d'art doivent résister aux efforts auxquels ils sont soumis sans risque de rupture, de détérioration ou d'usure prématurée. Les dimensions des pièces ne peuvent être déterminées que si l'on connait avec précision les propriétés des matériaux employés.

Les différentes propriétés d'un matériau sont définies par des nombres appelés caractéristiques. Les essais ont pour but de déterminer ces caractéristiques des matériaux sous ses différents efforts afin d'éviter les risques des ruptures des détériorations ou d'usure prématurée.

2. Classifications des essais

Les essais sont extrêmement nombreux comprennent :

2.1. Essais statiques

Dans tous ces essais, les éprouvettes sont soumises à des efforts croissants partant d'un point zéro jusqu'à un maximum correspondant à la rupture d'une manière progressive et lente. Ils comprennent les essais de traction, de compression, de flexion, de torsion et de cisaillement.

2.2. Essais dynamiques

Ils ont pour effet de placer l'éprouvette à essayer dans des circonstances analogues ou plus défavorable que celles subies par les organes d'une machine lors de son emploi. Ils constituent les essais de choc, de résilience, de fatigue.

2.3. Essais complémentaires

Ce sont les essais de dureté (ils ont une importance considérable dans la pratique) et les essais d'usure.

2.4. Essais de travail

Ces essais correspondent aux diverses applications industrielles et diffèrent suivant la forme et la destination des métaux à contrôler. Ce sont des essais de pliages à froid et à chaud, d'emboutissage, d'aplatissement.

2.5. Essais chimiques

Ils ont pour but de déterminer exactement la composition qualitative et de quantitative des produits employés ou élaborés.

3. Étude des principaux essais

On n'étudiera que les essais fondamentaux qui définissent les caractéristiques essentielles des matériaux et plus particulièrement les métaux :

a. Essai statique : essai de traction ;

b. Essai dynamique : essai de choc ou essai de fatigue ;

c. Essai complémentaire : essai de dureté.

3.1. Essai de traction

3.1.1. Définition

Une barre est sollicitée à la traction simple lorsque la résultante des efforts auxquels elle est soumise tend à allonger et qu'elle est dirigée suivant son axe. On a deux comportements à savoir : Comportements élastique et plastique.

✓ Comportement élastique : Il correspond à de petits déplacements réversibles des atomes autour de leur position d'équilibre dans le réseau cristallin. Sous l'action d'une force, les atomes s'écartent. Pour les matériaux métalliques et les polymères non étirés et non renforcés, les caractéristiques d'élasticité sont indépendantes de la direction et le comportement élastique est linéaire.

Ce n'est pas le cas pour les composites ou certains polymères pour lesquels le module d'Young varie avec l'amplitude de la déformation.

✓ Comportement plastique : Lorsque la limite d'élasticité est dépassée, les atomes du réseau cristallin ont changé de place sous l'action d'un effort de cisaillement.

La prise en compte des défauts du cristal, notamment des dislocations, est indispensable pour comprendre le comportement plastique.

3.1.2. Éprouvettes

✓ Pour les métaux en barre l'éprouvette est réalisée au tour, les éprouvettes de forme en générale cylindrique, sont soigneusement polies et calibrées (rectifiées pour les aciers). Le corps C de section constante S est terminée par deux têtes A et B raccordées au corps par des congés de rayon **r**. au milieu du corps, sur 1 ou 2 cm de longueur, on diminue le diamètre de 0,1 mm pour localiser la rupture. Sur le corps, en D et E, on marque deux légers coups de pointeau dont la distance L définit la longueur initiale de l'éprouvette.

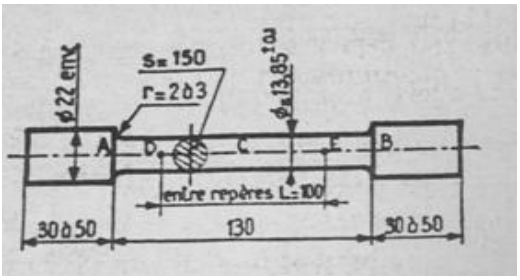


Fig.1 Éprouvette cylindrique pour essai de traction

Les dimensions dépendent des pièces qui les ont fournies ainsi que de la puissance de la machine de traction. Toute fois pour que les résultats puissent être comparables, les

dimensions principales (distance L en millimètre et section S en millimètre carré) doivent satisfaire à la relation de similitude suivante : $L = \sqrt{66{,}67 \times S}$

✓ Pour les métaux en feuille (tôles, barres plates, ou profilés jusqu'à 3 mm d'épaisseur), les éprouvettes sont plates à section rectangulaire. Elles peuvent être découpées à la scie, à la cisaille, ou au chalumeau, à condition que les cotes d'ébauche soient supérieures de 20 mm aux cotes définitives. Ces cotes finales sont ensuite atteintes à l'étau limeur, à la raboteuse ou à la fraiseuse. L'épaisseur des éprouvettes est celle des barres sur lesquelles elles ont été prélevées. La largeur varie de 20 à 30 mm suivant l'épaisseur. La longueur L est déterminée par la relation de la similitude précédente.

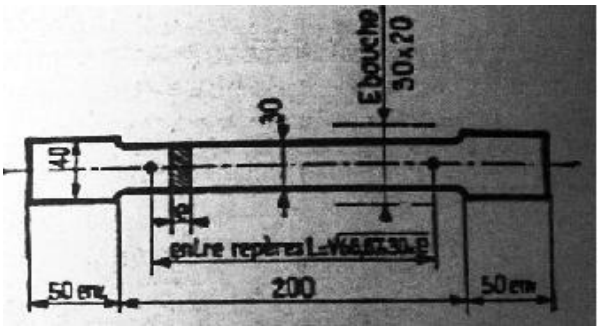


Fig.2 Éprouvette plate pour essai de traction

3.1.3. Diagramme de l'essai de traction

Presque toutes les machines de traction permettent l'enregistrement graphique de l'allongement de l'éprouvette en fonction de la charge. En abscisses sont portés les allongements exprimés en millimètres et en ordonnées sont les charges exprimées en newtons.

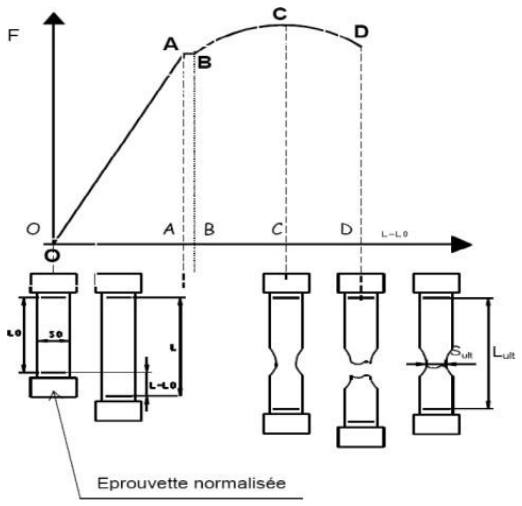


Fig.3 Diagramme d'essai de traction

✓ La partie **OA** correspond à une période de déformation où les allongements sont proportionnels aux charges c'est-à-dire si l'effort devient 2,3,…, n fois plus grand

l'allongement devient également 2,3,…, n fois plus grand. **C'est la période de déformation élastique.**

Si les forces cessent l'éprouvette reprend sa longueur initiale.

✓ Le point **B** marque la fin de la proportionnalité entre les efforts et les allongements, **c'est également la fin de l'élasticité**.

✓ La partie de courbe **BCD** correspond à une période des grands allongements qui croissent plus vite que les charges. **C'est la déformation permanente.** Si l'effort cesse l'éprouvette ne reprend plus sa longueur initiale.

✓ A partir du point **C** l'allongement augmente malgré une diminution de la charge. La rupture se produit après un étranglement de l'éprouvette.

D'une manière brève on peut classer de la manière suivante :

- **Zone OA** : domaine élastique ;
- **Zone AD** : domaine plastique ;
- **Zone AB** : domaine de grand glissement ;
- **Zone CD** : striction.

3.1.4. Caractéristiques mécaniques

- Limite apparente d'élasticité ou contrainte élastique $\mathbf{R_e}$ **;** c'est la contrainte au-dessus de laquelle la déformation est réversible. Elle représente la limite du domaine élastique, autrement dit elle est le quotient de l'effort élastique exprimé en newtons par la section initiale de l'éprouvette en millimètres carrés.

$$R_e = \frac{F_e(N)}{S(mm^2)}$$

Limite conventionnelle d'élasticité **Re = 0,2%.** On considère généralement un allongement relatif conventionnel $\boldsymbol{\varepsilon_0}$ **= 0,2%** c'est-à-dire quand **OA** n'est pas rectiligne, on doit utiliser la limite conventionnelle d'élasticité qui correspond à un allongement plastique de **0,2%.**

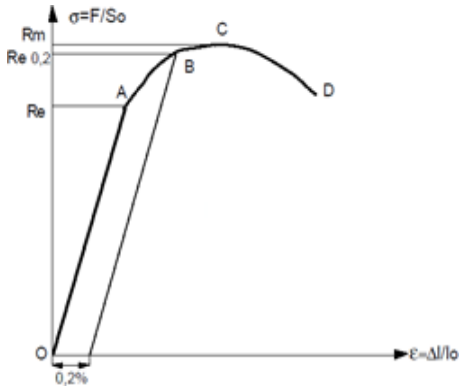


Fig.4 Diagramme de mise en évidence de $\mathbf{R_{e\ 0,2}}$

- La résistance à la rupture à l'extension **R_r** : c'est le quotient de l'effort à la rupture exprimé en newtons par la section de la section initiale de l'éprouvette en millimètres carrés.

$$R_r = \frac{F_r(N)}{S(mm^2)}$$

- Allongement maximum de rupture **a_r** est égal à la différence des longueurs de l'éprouvette après rupture **L_u** et avant essai **L_0.**

$$a_r = L_u - L_0$$

- Allongement pourcent : **A% :** soit la longueur initiale de l'éprouvette **L_0** entre deux repères et soit **L_u** la longueur ultime entre deux repères après la rupture de l'éprouvette, par définition l'allongement pourcent est égal :

$$A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

- Module d'élasticité **E** si **a** désigne l'allongement de limite élastique, **L_0** la longueur initiale de l'éprouvette, **i** l'allongement relatif élastique et **F_e** l'effort de limite élastique on a :

$$i = \frac{a}{L_0} = \frac{L_u - L_0}{L_0}$$

Le module d'élasticité E qui s'exprime en newtons par millimètres carrés est donné par la relation suivante :

$$E = \frac{R_e}{i} = \frac{F_e}{S} \times \frac{L_0}{L_u - L_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

- La striction de l'éprouvette **Z%** est obtenue par la relation ci-dessous :

$$Z\% = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100$$

Où **S_0** est la section initiale de l'éprouvette et **S_u** est la section minimale de l'éprouvette après rupture.

3.2. Essais de dureté

Définition : La dureté est la faculté de résistance qu'offre un corps à sa pénétration par un autre corps. La caractéristique de dureté est mesurée directement sur les barres ou sur les pièces terminées sans passées par l'intermédiaire d'une éprouvette

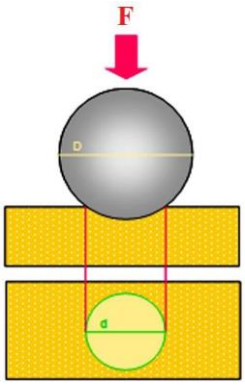
Principe : Que ce soit pour une dureté Brinell, Rockwell ou Vickers, l'essai consiste à appliquer sur une pièce à mesurer, un pénétrateur (dont la forme varie selon le type de l'essai) sous une charge F (variable).

3.2.1. Essai de dureté Brinell

Historique **: Johan August BRINELL** (1849–1925), ingénieur métallurgiste suédois,

travaillait sur la transformation des aciers en fonction de la température. Il avait besoin d'un test rapide non destructif pour déterminer la dureté des différents aciers testés. Il met au point son test de dureté Brinell basé sur une indentation, pour alliages métalliques peu durs.

Principe **:** Sur une bille en acier trempé de 10 mm de diamètre placée sur la pièce, on exerce le poids d'une masse de 3000 kg (soit P = 3000 daN) passant par le centre de la bille et normal à la surface à la pièce. La bille pénètre d'autant plus que la dureté de métal à essayer est petite. La durée d'application de l'effort est environ 15 secondes.



$$HB = \frac{F}{S}$$

$$S = \frac{\pi \times D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}{2}$$

$$HB = \frac{2 \times F}{\pi \times D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$

Fig.5 principe de l'essai de dureté de Brinell

3.2.2. Essai de dureté Vickers

Historique **:** **SMITH** et **SANDLAND**, ingénieurs chez VICKERS Ltd GB ont besoin de tester des matériaux trop durs pour le test Brinell. En 1925, ils conçoivent une pyramide diamant. Cette pyramide de diamant à base carrée a un angle au sommet de 136°.

Principe **:** On utilise une pointe de diamant ayant la forme d'une pyramide à base carrée dont l'angle au sommet vaut 136°. La force de pénétration Pest comprise entre 50 et 1250 N (50-100-200-300-500-800-1200-1250 N). Au moyen d'une lunette spéciale, on mesure, sur la pièce, la diagonale d (mm) où $d_1 = d_2 = d$ de la base carrée de l'empreinte pyramidale.

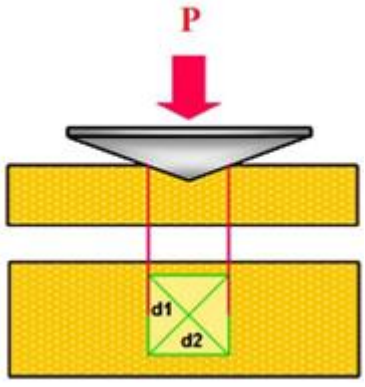


Fig.6 : principe de l'essai de dureté de

La surface de l'empreinte a pour expression:

$$S = \frac{d^2}{2 \times \sin(\frac{136°}{2})} = \frac{d^2}{1{,}854}$$

La dureté Vickers s'exprime par le rapport de la force et de la surface est :

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{1{,}854 \times P}{d^2}$$

3.2.3. Essai de dureté Rockwell

***Historique*:** **Stanley ROCKWELL** travaille comme métallurgiste dans une usine de roulements à billes. Il vérifie les traitements thermiques par des tests de dureté. L'essai Brinell donne une indentation (découpure en forme de dent) trop grosse. L'essai Vickers est trop long. En 1922, Rockwell conçoit un nouveau système avec différents pénétrateurs, adapte aux métaux et aux plastiques avec une large gamme de matériaux testés.

Principe **:** Le pénétrateur est soit :

- une bille en acier de diamètre 1,59 mm = **Rockwell b** pour les matériaux mous comme les alliages de cuivre ;
- un cône en diamant d'angle au sommet 120° et dont l'extrémité est une calotte sphérique de rayon 0,1mm = **Rockwell c**, pour les matériaux plus durs comme l'acier. Le diamant est monté sur une pièce métallique ; l'ensemble porte le nom de ***cône Brasle.***

L'effort exercé varie avec la dureté du métal essayé. Il ne dépasse pas 1500 N.

Pré-charge F_0 faible de 10 daN = niveau de référence

Surcharge F_1 de 60 à 150 daN

Charge $F_2 = F_0$ à nouveau de 10 daN.

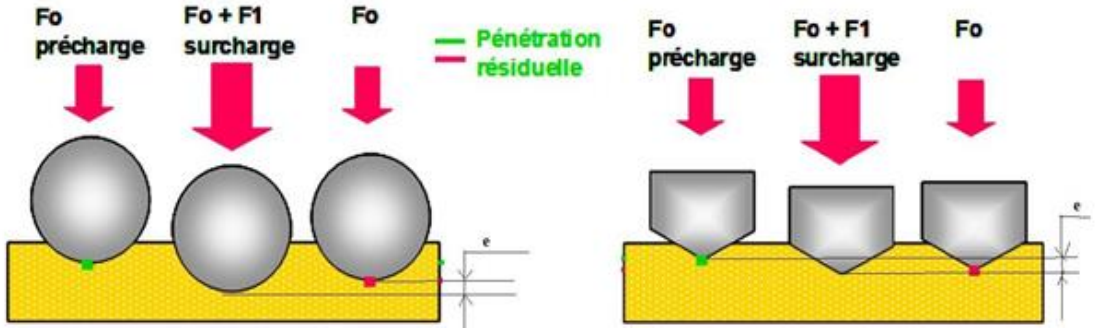


Fig.7 Principe de l'essai de dureté Rockwell b et Rockwell c

3.3. Essais au choc

3.3.1. Généralités

On dit qu'un corps est ***fragile*** lorsqu'il se rompt sous l'action de chocs ou d'efforts brusques. Un choc est caractérisé par l'énergie qu'il met en jeu ; donc les essais au choc ont pour but de déterminer le travail nécessaire pour rompre une éprouvette de section connue. L'aptitude que possède un métal à résister au choc s'appelle la *résilience* que l'on désigne par la lettre K.

3.3.2. Essai de résilience

3.3.2.1. Définition

La résilience d'un métal est déterminée en brisant en une seule fois l'éprouvette de métal à essayer en mesurant l'énergie nécessaire à la rupture. Si ***S*** est la section de l'éprouvette

exprimée en centimètre carré et ***W*** est l'énergie nécessaire à la rupture exprimée en joule, la résilience ***K*** est définie comme le rapport de l'énergie par la section. Donc K représente en d'autre terme l'énergie en joule à dépenser par centimètre carré de la surface à rompre.

3.3.2.2. Éprouvette

L'éprouvette est un barreau à section carrée 10x10 mm^2 et de longueur L = 55 mm. Elle est entaillé dans sa partie centrale, il existe deux types d'entailles ; l'entaille en V (angle de 45° et de profondeur 2mm) mais la plus utilisée est l'entaille en U de profondeur 5mm et de rayon en fond d'entaille de 1mm.

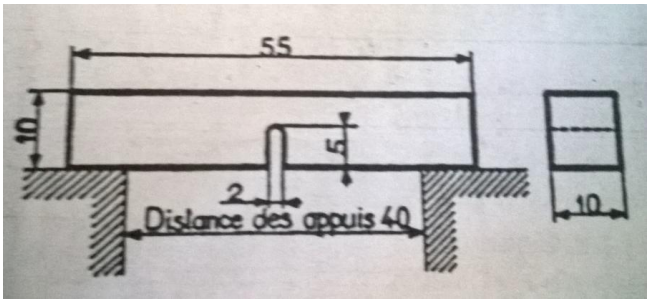


Fig.8 Éprouvette entaillé par essai de choc

3.4. Machines d'essais

3.4.1. Mouton ordinaire

Il est constitué par une masse de 12 kg pouvant tomber d'une hauteur variable. Cette masse comporte une partie saillante, terminée par un arrondi.

Avec ce mouton, il est impossible de déterminer la hauteur de la chute pour laquelle le travail, mesuré par $P \times H$, correspond exactement à l'énergie nécessaire pour provoquer la rupture de l'éprouvette. On se contente de préciser les conditions de l'essai. Par exemple, il sera spécifié que l'éprouvette de 40 x 40, en fonte ne doit pas casser lorsqu'on fait tomber successivement le mouton de 0,25 m, 0,30 m, 0,35m, 0,40 m. ce mouton est uniquement utilisé pour l'essai des fontes.

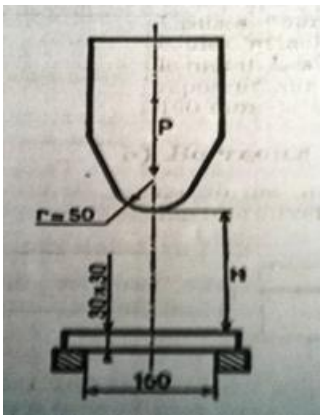


Fig.9 Schéma du mouton ordinaire

3.4.2. Mouton de Frémont

Même principe que le mouton ordinaire mais complété par un système de ressort destiné à enregistrer l'énergie en excès après rupture par l'intermédiaire d'une tige se déplaçant devant une réglette graduée.

L'énergie disponible au moment de choc est : $W = P \times H$

L'énergie résiduelle par surface de l'éprouvette après le choc est indiquée par la tige solidaire du ressort sur la réglette graduée. $K = W - W_r$

Exemple : si le mouton de masse 12,5 kg tombe d'une hauteur de 2 m et si, l'énergie résiduelle mesurée sur la réglette est de 60 J on a alors :

- L'énergie disponible avant choc est : $W = P \times H = 125 \times 2 = 250J$
- L'énergie absorbée par le choc est : $W - W_r = 250 - 60 = 190J$
- Si l'éprouvette a une section de 2 cm^2, la résilience (l'énergie par la section) a pour valeur :

$$K = \frac{W - W_r}{S} = \frac{250 - 60}{2} = \frac{190}{2} = 95J / cm^2$$

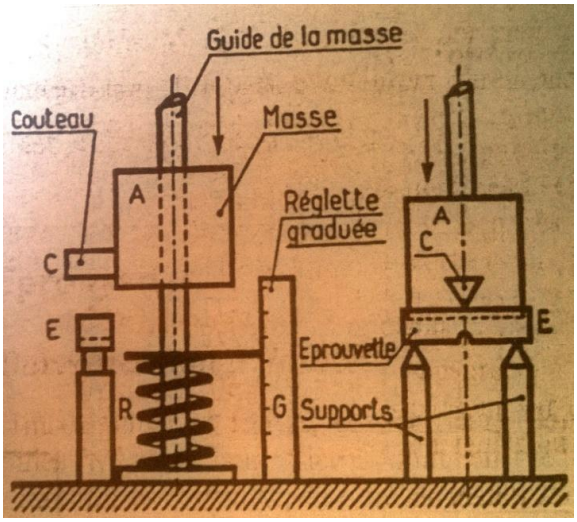


Fig.10 Schéma du mouton de Frémont

3.4.3. Mouton pendulaire de Charpy

Le pendule est constitué par une masse M en acier forgé qui peut osciller autour d'un axe **O**. la masse pendulaire a la forme d'un disque présentant une entaille biseauté ou couteau. L'éprouvette se place sur le bâti en **T**, de façon que le plan d'oscillation coïncide avec le plan axial de l'entaille. Le pendule est remonté puis lâché. Il passe entre les jambes du bâti, brise l'éprouvette et remonte jusqu'en **G**'. Au moment où le couteau entre en contact avec l'éprouvette, l'énergie disponible est égale à : $W = P \times H$.

Une partie de cette énergie par la rupture de l'éprouvette ; l'énergie en excès, qui permet au pendule de remonté jusqu'en **G**' a pour valeur $P \times H'$.

Le travail nécessaire pour briser l'éprouvette est donc :

$$(P \times H) - (P \times H') = P(H - H')$$

Si S est la section de l'éprouvette en cm^2, la résilience est :

$$K = \frac{P \times (H - H')}{S}$$

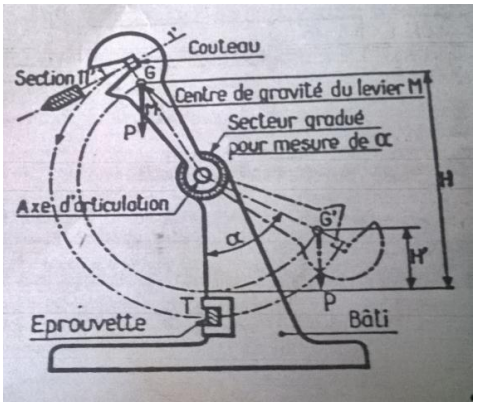


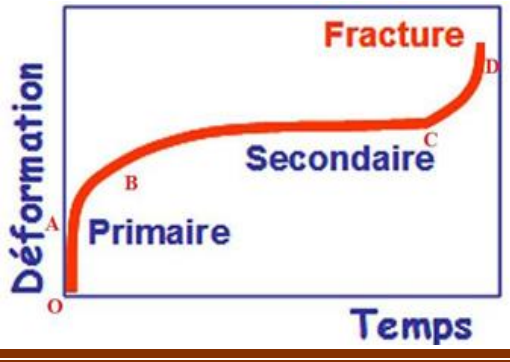
Fig.11 Schéma du mouton pendulaire de Charpy

3.5. Essai de fluage

La déformation continue des objets, avec le temps, sous l'action d'efforts appliqués constants est appelée *fluage.* Le phénomène de fluage est observé dans le système travaillant pendant de longues durées voire une décennie ou deux décennies et plus (10, 20 ans…) ou dans des machines travaillant sous températures élevées (chaudières, turbines, moteurs d'avion…).

L'essai de fluage est un essai de traction, à chaud ou non, de longue durée. La rupture se produit sous des contraintes bien inférieures aux limites usuelles du matériau.

Certains matériaux tels que les matières plastiques présentent du fluage à température ambiante. Pour les métaux le fluage est surtout sensible à des températures comprises entre 35 et 70% de leur température de fusion. Le fluage a plus d'effet sur les céramiques que sur les métaux.



OA : mise sous contrainte, déformation élastique instantanée;
AB : phase d'écrouissage avec taux de fluage decroissant;
BC : phase la plus longue avec fluage à taux constant;
CD : accelération du processus de fluage avec rupture en D.