

**MECA-H-201**

**Laboratoires de Technologies**

## Table des matières

Introduction.....	3
Partie 1 : Généralités .....	4
Règles de sécurité pour les travaux au laboratoire.....	4
Présentation du projet de laboratoire .....	4
Base .....	5
Pot .....	5
Côté .....	5
Patte .....	5
Opérations à réaliser lors des laboratoires .....	5
Partie 2 : Travaux théoriques .....	6
Dessin technique .....	6
Définition.....	6
Analogie et différences entre le dessin technique et le dessin d’art .....	6
Activités liées au dessin industriel.....	6
Quelques définitions relatives aux dessins techniques.....	7
Cotation .....	10
Tolérances .....	10
Exercices .....	19
La sélection de matériaux avec le logiciel CES .....	22
Présentation pour la sélection de matériaux.....	22
Exercices .....	35
Partie 3 : Travaux pratique .....	44
Introduction à la métrologie des longueurs et les outils de mesure utilisés au laboratoire .....	44
Généralités .....	44
Les appareils de mesure .....	45
Les erreurs de mesure .....	50
Le contrôle de géométries.....	52
Le contrôle de l’état de surface.....	52
Les principes généraux de l’usinage par enlèvement de copeaux.....	53
Vitesse de coupe – vitesse d’avance .....	54
Liquide de coupe .....	54
Précision de l’usinage .....	54

Laboratoire Fraisage.....	56
Objectif du laboratoire.....	56
Introduction théorique au fraisage.....	56
Travail à préparer avant la séance.....	60
Déroulement de la séance.....	61
Laboratoire de soudage.....	62
Objectif de la séance.....	62
Introduction théorique au soudage.....	62
Travail à préparer avant la séance.....	80
Déroulement de la séance.....	80
Laboratoire de tournage.....	81
Objectif du laboratoire.....	81
Introduction théorique au tournage.....	81
Travail à préparer avant la séance.....	93
Déroulement de la séance.....	95
Laboratoire d'assemblage.....	96
Objectif du laboratoire.....	96
Introduction théorique à l'assemblage.....	96
Travail à préparer avant la séance.....	102
Déroulement de la séance.....	102
Bibliographie.....	104
Norme pour le tolérancement.....	1
Dossier de plans pour le projet.....	7

## **Introduction**

Le présent syllabus reprend les informations nécessaires à la compréhension et au bon déroulement des séances d'exercice et de laboratoire du cours de Technologies.

Les étudiants prépareront chacune des séances en lisant les chapitres concernés, et en répondant aux éventuelles questions.

Une introduction générale est d'abord donnée pour les matières communes à plusieurs séances. Parfois des renvois pourront être faits vers le cours.

## Partie 1 : Généralités

Organisation des séances de travaux pratiques/laboratoires

La partie pratique du cours de Technologies est constituée de six après-midi de travaux :

- Une séance d'exercice sur la cotation et le tolérancement
- Une séance de travaux sur la sélection de matériaux, sur le logiciel CES
- Une séance de laboratoire sur le fraisage
- Une séance de laboratoire sur le tournage
- Une séance de laboratoire sur le soudage
- Une séance de laboratoire sur l'assemblage

### Règles de sécurité pour les travaux au laboratoire

Les séances de laboratoires se déroulent au hall de mécanique du bâtiment L (service ATM). Au cours de ces séances vous allez utiliser des machines d'usinage qui peuvent engendrer de graves blessures si elles sont mal utilisées.

Il est donc indispensable de suivre les instructions données par le technicien responsable de la séance, et de respecter les règles suivantes :

- Porter des vêtements adéquats. L'idéal est de porter un tablier en coton pour protéger vos vêtements d'éventuelles projections d'huile ou de copeaux, ou de métal en fusion dans le cas du soudage. Pour les mêmes raisons, il est important de porter des chaussures fermées.
- Ne jamais ramasser de copeaux à mains nues. Ceux-ci peuvent s'avérer extrêmement coupants, surtout s'il s'agit d'acier inoxydable par exemple.
- Ne jamais approcher les mains de la broche d'une machine lorsque celle-ci est en rotation. Attendre l'arrêt complet de la broche avant de s'en approcher.
- Ne jamais porter un vêtement ou un objet qui pourrait tomber se prendre sur un des organes mobile de la machine : cravate, écharpe, foulard, écouteurs de baladeur, etc.

### Présentation du projet de laboratoire

Les quatre séances de laboratoire vont s'articuler autour d'un projet commun, afin de permettre aux étudiants de comprendre les liens existants entre les différentes techniques d'usinage.

L'objectif est de réaliser un porte-crayon. Le dispositif est constitué des 6 pièces suivantes :

- Une plaque de base, en acier, appelée *base*
- Un petit pot cylindrique, en aluminium, appelé *pot*
- Deux montants pour porter deux crayons horizontalement, l'un en polycarbonate, l'autre en aluminium, appelés *côté*
- Deux pattes de support en acier, appelées *patte*

Le plan de chaque pièce est donné dans le cahier de plan ci-joint.

Détaillons ici chacune des pièces, les opérations seront déjà réalisées préalablement aux séances et les opérations qui devront être faites sur chacune d'elles lors des laboratoires.

## Base

Cette pièce est débitée à partir d'une plaque de section adéquate. Le trou destiné à recevoir le pot et les rainures destinées à recevoir les côtés seront réalisés sur une fraiseuse.

Il faudra réaliser les perçages pour l'assemblage des côtés et réaliser les soudures pour fixer les pattes.

## Pot

Le pot est débité à partir d'un barreau dont le diamètre extérieur est celui de la pièce à obtenir.

Aucune opération préalable ne sera réalisée pour cette pièce. Au cours du laboratoire, vous couperez la pièce à la scie à partir du barreau et réaliserez toutes les opérations d'usinage nécessaires pour obtenir la pièce désirée.

## Côté

Les deux côtés sont réalisés dans des matériaux différents, afin de présenter de permettre aux étudiants d'usiner un polymère (polycarbonate, PC) en plus de l'usinage de métaux. Les étapes pour la réalisation des deux pièces sont identiques, mais les réglages des machines seront différents. Les côtés sont débités à partir de plaques. Deux côtés (a et b) sont rectifiés à la fraiseuse, pour s'assurer de leur perpendicularité et planéité. Ensuite les deux trous, servant à fixer la pièce dans un gabarit de fixation, sont percés.

Il faudra réaliser à la fraiseuse la géométrie permettant d'accueillir les deux crayons.

## Patte

Les pattes de fixations sont débitées dans un profilé de section adéquate. Il n'y a aucune opération à réaliser sur la pièce. Celles-ci devront être soudées sur la base.

## Opérations à réaliser lors des laboratoires

En résumé, les opérations à réaliser lors de chaque laboratoire sont reprises ci-dessous :

- Fraisage : usinage de deux faces des deux côtés
- Tournage : usinage du pot et fixation du pot dans la base, à la presse hydraulique
- Assemblage : perçage des côtés et de la plaque de base, taraudage des côtés et assemblage des côtés sur la plaque de base
- Soudage : soudage des pattes sur la plaque de base

## Partie 2 : Travaux théoriques

### Dessin technique

#### Définition

Une introduction au dessin technique a été réalisée dans le cadre du projet multidisciplinaire de BA1. Nous rappellerons ici les concepts essentiels.

Un dessin technique est une représentation graphique de machines ou d'organes de machines destinés à être fabriqués dans un atelier d'usinage. Les dessins techniques sont exécutés le plus souvent dans un bureau d'études. Ils sont acheminés ensuite vers un atelier de fabrication où ils servent à guider l'ouvrier dans l'exécution de la pièce.

Les étapes successives nécessaires à la réalisation des pièces relatives à un mécanisme peuvent exiger une gamme de dessins exprimant des idées très différentes.

#### Analogie et différences entre le dessin technique et le dessin d'art

Le dessin technique et le dessin d'art sont des reproductions graphiques d'objets. Une différence essentielle les sépare dans leur représentation. Dans une même classe, la représentation « à vue » d'un objet quelconque sera différente suivant la position occupée par l'élève dans la classe. Celui-ci cherchera à représenter l'objet tel qu'il le voit. C'est le dessin d'art ou dessin à vue. Pour le dessin technique, il en est autrement. Qu'importe l'angle sous lequel l'objet est vu, la représentation sera identique pour un nombre quelconque d'élèves.

Cette similitude dans la reproduction est due à l'application de règles rigoureuses appelées normes. Ces différentes normes forment un véritable langage qu'il est indispensable d'apprendre et de connaître parfaitement.

Langage écrit, dont les règles d'écriture sont communes à de très nombreux pays, le dessin technique est le moyen privilégié d'échange entre les techniciens du monde entier. Les règles auxquelles il obéit sont fixées sur le plan international par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO : International Standard Organisation) et sont adaptées pour la Belgique par l'Institut Belge de Normalisation (IBN) œuvrant elle-même au sein du Comité Européen de Normalisation.

Il existe de très nombreux domaines dans lesquels des normes fixent des conditions à respecter pour de très nombreux produits. Le respect des normes est obligatoire lors de l'établissement des marchés administratifs. La plupart des grandes entreprises d'Etat ou privées les prennent comme références. Elles font foi devant les tribunaux si un litige vient à apparaître.

#### Activités liées au dessin industriel

Comme tout langage, le dessin technique fera appel à deux types d'activités :

1. La compréhension ou le décodage d'une situation technique donnée, plus ou moins complexe, à partir d'un plan ou d'un ensemble de plans, activité d'interprétation.
2. L'expression ou le codage d'une situation technique envisagée (projetée) par l'établissement d'un plan ou d'un ensemble de plans, activité de représentation.

Ces deux types d'activité (qui se juxtaposent souvent lors de l'établissement d'un projet) demandent la connaissance de règles de base et la possibilité de consulter certaines normes de dimensions de produits.

## Quelques définitions relatives aux dessins techniques

### *Termes désignant différents documents tracés*

- Croquis : Dessin établi totalement ou en majeure partie sans l'aide d'instruments de guidage ou de mesure. Il peut être partiellement ou totalement coté : croquis coté.
- Esquisse : Dessin préliminaire des grandes lignes d'un objet, établi en vue du choix d'une solution ou d'une mise au net ultérieure. Il est généralement exécuté au crayon, en trait fin, pour permettre des modifications.
- Dessin : Représentation graphique établie totalement ou en majeure partie avec l'aide d'instruments de guidage et de mesure conduits à la main ou mécaniquement. Cette représentation est aussi exacte que possible en formes et en positions.
- Schéma : Dessin, sous une forme simplifiée ou symbolique, plus ou moins poussée, des fonctions remplies par une succession d'organes ainsi que de leurs liaisons.

Les dessins les plus couramment rencontrés répondront aux définitions suivantes :

- Dessin d'ensemble : Dessin donnant la représentation, plus ou moins détaillée, d'un bâtiment, d'une installation, d'un assemblage, etc. ou d'une de leurs parties (sous-ensemble)
- Dessin de définition : Dessin définissant, complètement et sans ambiguïté, les exigences auxquelles doit satisfaire le produit dans l'état de finition prescrit. Ce dessin fait partie des documents qui font foi dans les relations entre les parties contractantes. Attention : il est entendu par « état de finition prescrit » celui indiqué par le dessin ; ce n'est pas nécessairement l'état définitif du produit.
- Détail d'exécution : Dessin détaillé, généralement établi à partir du dessin de définition, donnant toutes les indications nécessaires à la réalisation d'un produit. Selon le genre d'exécution, ces dessins peuvent s'appeler plus spécifiquement :
  - Dessin de fabrication
  - Dessin d'opération
  - Dessin d'assemblage ou de montage
  - Dessin d'installation
  - Dessin d'implantation

## Types de lignes

Le tableau ci-dessous reprend l'usage des différents types de traits utilisé dans le dessin technique.

Tableau 26/1

Dénomination et exemples d'utilisation  
(Désignation des traits A1 ... K4 voir Fig. 27/1)

**Continu fort:** Contours vus, arêtes vues (A1).

A 

**Continu fin:** Lignes fictives vues (B1), Lignes de cote (B2), Lignes d'attaches (B3),  
Lignes de repère (B4), Hachures (B5), Contours de sections rabattues sur place (B6),  
Axes courts. Arêtes de pliage dans les développements.

B 

**Continu fin à main levée:**

C 

**Continu fin (droit) avec zigzags:**

D <sup>1)</sup> 

Lignes de brisure: Limites de vues  
ou coupes, partielles ou interrompues,  
si ces limites ne sont pas des traits  
mixtes fins (C1).

**Interrompu fin:** Contours cachés, arêtes cachées (F1).

F 

**Mixte fin:** Axes de révolution (G1), Traces de plan de symétrie (G2).

G 

**Mixte fin, fort aux extrémités et aux changements de plans de coupe:**

Traces de plans de coupe (H1).

H 

**Mixte fort:** indication de lignes, de surfaces ou d'éléments de pièces  
faisant l'objet de spécifications particulières (J1).

I 

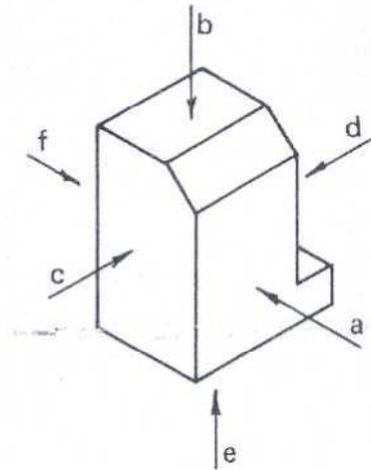
**Mixte fin à deux tirets:** Contours de pièces voisines (K1), Positions intermédiaires et extrêmes  
de pièces mobiles (K2), Contours de la forme primitive (K4), Lignes de centres de gravité.  
Parties situées en avant d'un plan de coupe. Contours de la pièce finie dessinée à l'intérieur  
de la pièce brute.

K 

### *Vue principale et vues projetées*

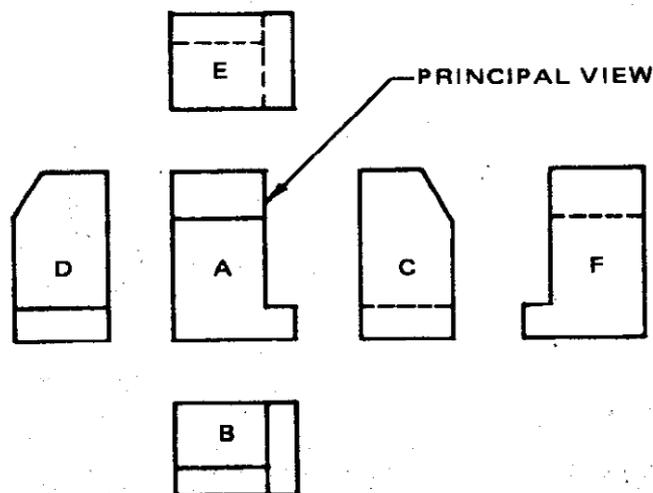
La représentation de l'objet ou du système sur un dessin technique se fait à partir de vues projetées. Les différentes vues sont définies à partir d'une vue particulière appelée la vue de face. Le choix de cette vue de face est donc important, et est effectué en fonction des critères suivants :

- Face qui, parmi toutes les faces, est celle qui permet d'identifier le mieux la pièce
- Face qui permet d'estimer les dimensions de la pièce, de son gabarit



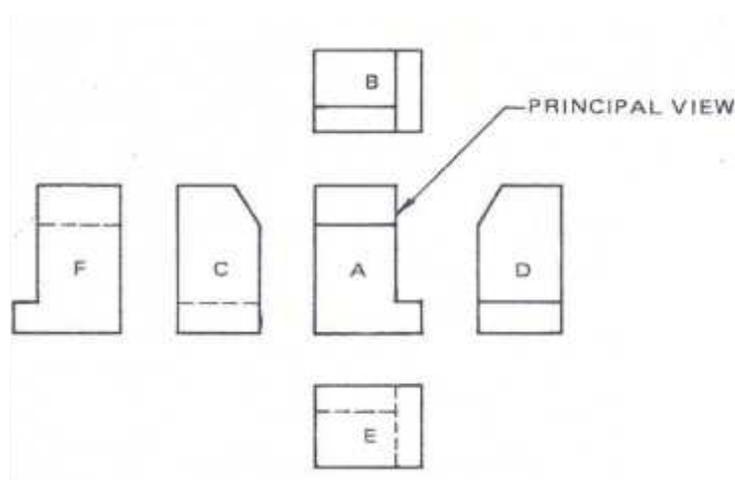
*Illustration des différentes vues d'une pièce. (a) donnera la vue de face, (b) est le dessus, (c) est le côté gauche, (d) est le côté droit, (e) est le dessous et (f) est l'arrière*

Les vues projetées sont les vues qui correspondent aux côtés gauche, droit, au dessus, au dessous et à l'arrière de la pièce. Leur position relativement à la position de la vue de face doit respecter une convention, qui doit être reprise sur le cartouche. Cette convention est différente en Europe et aux USA. En Europe, la position des vues projetées s'obtient en tournant la pièce « au-dessus » de la feuille de papier. Ainsi, la vue de gauche se place à droite de la vue de face, la vue de droite se place à gauche, la vue du dessus se place sous la vue de face, etc.



*Position des vues projetées par rapport à la vue de face, convention européenne*

Aux USA, la convention est inverse : la position des vues projetées s'obtient en faisant tourner la pièce « en-dessous » de la feuille de papier. La vue de gauche est donc à gauche de la vue de face, etc.



*Position des vues projetées par rapport à la vue de face, convention américaine*

Il est évidemment important de connaître la convention utilisée, sinon la réalisation de la pièce sera la copie symétrique de la pièce souhaitée. Pour déterminer la convention utilisée, il est possible de l'indiquer dans le cartouche, grâce aux symboles suivants représentant la projection d'un cône tronqué :



*A gauche, le symbole de projection indiquant la convention européenne, à droite le symbole indiquant la convention américaine*

## Cotation

Pour la cotation de dessin, se référer à la norme NBN 518 (1960).

Rappelons qu'en mécanique, sauf mention contraire, les cotes d'un plan sont indiquées en millimètres.

## Tolérances

### Réalisation pratique d'une cote

Les dispersions inhérentes à tous les moyens de fabrication existant actuellement entraînent l'impossibilité d'obtenir une cote mathématiquement exacte sur une pièce. Pour rendre possible la fabrication, il est donc nécessaire de prévoir les limites maximum et minimum admissibles pour chacune des cotes à réaliser.

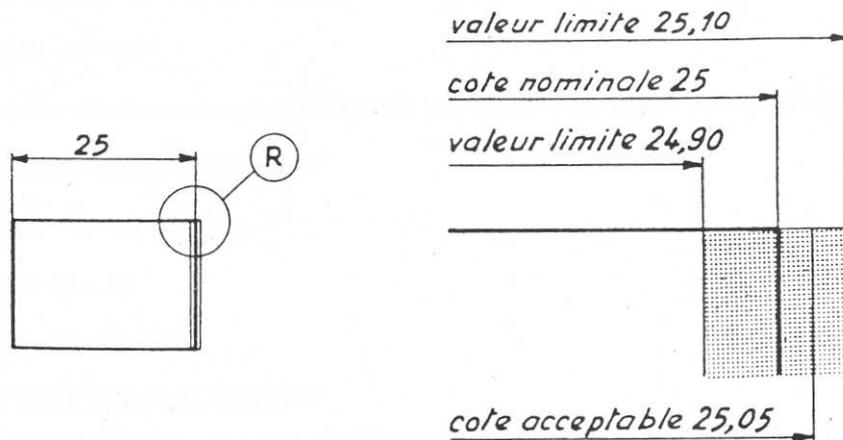
### Zone de tolérance

Etant dans l'impossibilité de réaliser exactement une cote, il est nécessaire de définir une plage de valeurs qui seront tolérées. On limite cette incertitude en la localisant entre deux valeurs voisines de

la valeur dite nominale. L'intervalle dimensionnel existant entre ces deux valeurs limites constitue une zone appelée *Zone de tolérance*, ou parfois *intervalle de tolérance*.

Pour qu'une dimension soit acceptable, il suffit qu'elle soit comprise dans la zone de tolérance déterminée par deux valeurs limites données.

*Exemple* : la figure ci-dessous nous montre un parallépipède rectangle sur lequel est figurée la zone de tolérance (très amplifiée) se rapportant à la cote nominale de 25. La zone de tolérance est limitée par les valeurs 24,90 et 25,10. La valeur 25,05 est donc acceptable.



### Limites de la zone de tolérance

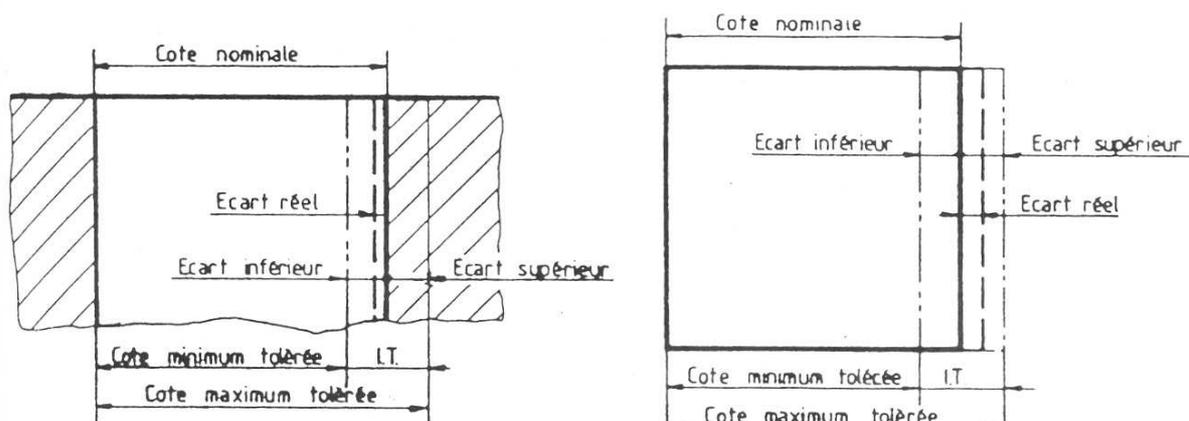
Reprenons l'exemple précédent. Une dimension, pour être acceptable, doit remplir deux conditions : il faut que cette dimension soit égale ou inférieure à 25,10, et il faut que cette dimension soit égale ou supérieure à 24,90. Les nombres 25,10 et 24,90 sont les valeurs limites de la zone de tolérance :

- 25,10 est la *limite supérieure* ou valeur maximale de la cote
- 24,90 est la *limite inférieure* ou valeur minimale de la cote

### Intervalle de tolérance et Ecart

La différence des valeurs entre la cote maximale et la cote minimale correspond à la taille de la zone de tolérance, appelée Intervalle de Tolérance (IT). Ceci est illustré sur la figure ci-dessous.

$$IT = Cote\ Maxi - Cote\ Mini$$



La différence des valeurs entre la cote maximale et la cote nominale est appelée écart supérieur (ES).

$$ES = Cote\ Maxi - Cote\ nominale$$

La différence des valeurs entre la cote minimale et la cote nominale est appelée écart inférieur (EI).

$$EI = Cote\ Mini - Cote\ nominale$$

Notons que :

- Ces écarts sont des valeurs signées
- La cote nominale ne doit pas nécessairement se trouver dans la zone de tolérance. Autrement dit, il est possible que EI et ES aient le même signe.

### **Notion d'ajustement**

Dans de nombreux montages, les pièces s'imbriquent l'une dans l'autre avec un jeu (ou un serrage) prévu au moment de la conception du projet par le dessinateur.

Dans ces montages, une pièce contient l'autre :

- La pièce contenante sera appelée **Alésage**
- La pièce contenue sera appelée **Arbre**

Définir avec précision le jeu ou le serrage, nécessaire au bon fonctionnement d'un ensemble arbre-alésage, c'est définir : l'**Ajustement** de l'arbre dans l'alésage.

Un arbre sera dit **ajusté** dans un alésage lorsqu'ils auront tous les deux la même cote nominale. Trois cas se présentent :

- L'intervalle de tolérance de l'alésage sera entièrement à l'extérieur de l'intervalle de tolérance de l'arbre. L'ajustement sera dit **avec jeu**.

A un ajustement avec jeu correspond :

- Un ajustement libre (jeu important)
- Un ajustement tournant (arbre et coussinet)
- Un ajustement glissant (coulisseau et glissière)

Le montage et le démontage d'un ajustement avec jeu peuvent s'effectuer à la main.

- L'intervalle de tolérance de l'alésage et l'intervalle de tolérance de l'arbre se recouvrent partiellement. L'ajustement sera dit **incertain**.

A un ajustement incertain correspond :

- Un ajustement glissant juste (centrage). Le montage et le démontage d'un ajustement glissant juste nécessitent une pression accentuée de la main.
- Un ajustement légèrement dur (outils montés sur un arbre : foret, toupie, ...). Le montage et le démontage d'un ajustement légèrement dur nécessitent l'emploi d'un maillet.

- L'intervalle de tolérance de l'alésage est entièrement à l'intérieur de l'intervalle de tolérance de l'arbre. L'ajustement sera dit **avec serrage**.

A un ajustement avec serrage correspond :

- Un ajustement bloqué (poulie fixe, volant, manchon d'accouplement). Le montage et démontage d'un ajustement bloqué nécessitent l'emploi d'un marteau à main.
- Un ajustement pressé (pied de centrage, bague rapportée). Le montage et le démontage d'un ajustement pressé nécessitent une très forte pression pouvant être réalisée par l'emploi d'une presse.

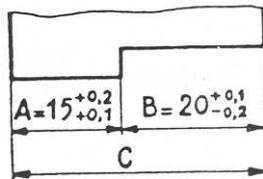
### Indication des tolérances sur dimensions

Se référer à la norme NBN 580 (1961), donnée en annexe.

Les tolérances sur dimensions s'inscrivent à la suite de la cote nominale, soit sous forme numérique, soit sous forme symbolique.

### Propriétés des cotes tolérancées

Somme de deux cotes tolérancées  $A+B=C$



Calcul des valeurs maximale et minimale de la cote C

$$\begin{aligned} C_{Maxi} &= A_{Maxi} + B_{Maxi} \\ &= (15 + 0,2) + (20 + 0,1) \\ &= 35 + 0,3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{mini} &= A_{mini} + B_{mini} \\ &= (15 + 0,1) + (20 - 0,2) \\ &= 35 - 0,1 \end{aligned}$$

Calcul des écarts supérieur et inférieur de la cote C

$$\begin{aligned} ES \text{ de } C &= ES \text{ de } A + ES \text{ de } B \\ &= (0,2) + (0,1) \\ &= 0,3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} EI \text{ de } C &= EI \text{ de } A + EI \text{ de } B \\ &= (0,1) + (-0,2) \\ &= -0,1 \end{aligned}$$

Calcul de l'intervalle de tolérance de la cote C

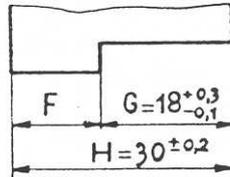
$$\begin{aligned} IT \text{ de } C &= ES \text{ de } C - EI \text{ de } C \\ &= (ES \text{ de } A + ES \text{ de } B) - (EI \text{ de } A + EI \text{ de } B) \\ &= 0,3 - (-0,1) \end{aligned}$$

$$IT \text{ de } C = 0,4$$

Donc

$$IT \text{ de } C = IT \text{ de } A + IT \text{ de } B$$

Différence de deux cotes tolérancées  $H-G=F$



Calcul des valeurs maximale et minimale de la cote F

$$\begin{aligned} F_{Maxi} &= H_{Maxi} - G_{Mini} \\ &= (30 + 0,2) - (18 - 0,1) \\ &= 12 + 0,3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{mini} &= H_{mini} - G_{maxi} \\ &= (30 - 0,2) - (18 + 0,3) \\ &= 12 - 0,5 \end{aligned}$$

Calcul des écarts supérieur et inférieur de la cote F

$$\begin{aligned} ES \text{ de } F &= ES \text{ de } H - EI \text{ de } G \\ &= (0,2) - (-0,1) \\ &= 0,3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} EI \text{ de } F &= EI \text{ de } H - ES \text{ de } G \\ &= (-0,2) - (+0,3) \\ &= -0,5 \end{aligned}$$

Calcul de l'intervalle de tolérance de la cote F

$$\begin{aligned} IT \text{ de } F &= ES \text{ de } F - EI \text{ de } F \\ &= (ES \text{ de } H - EI \text{ de } G) - (EI \text{ de } H - ES \text{ de } G) \\ &= 0,3 - (-0,5) \end{aligned}$$

$$IT \text{ de } F = 0,8$$

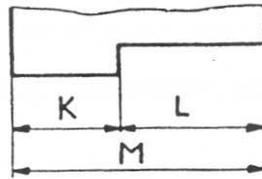
Donc

$$IT \text{ de } F = IT \text{ de } G + IT \text{ de } H$$

**Règle** : L'intervalle de tolérance relatif à une somme ou à une différence de deux cotes tolérancées est égal à la somme des intervalles de tolérances de ces deux cotes.

### Chaîne fermée de cotes tolérancées

Soit à vérifier simultanément l'existence de trois cotes tolérancées K, L et M disposées de façon telle que l'une d'elles soit la somme des deux autres ( $M=K+L$ )



Nous savons que :

- $IT\ de\ K = IT\ de\ L + IT\ de\ M$
- $IT\ de\ L = IT\ de\ K + IT\ de\ M$
- $IT\ de\ M = IT\ de\ L + IT\ de\ K$

En additionnant membre à membre, il vient :

- $IT\ de\ K + IT\ de\ L + IT\ de\ M = 2(IT\ de\ K + IT\ de\ L + IT\ de\ M)$

ce qui est impossible.

**Conclusion** : Si des cotes tolérancées forment une chaîne fermée, leurs intervalles de tolérances sont incompatibles.

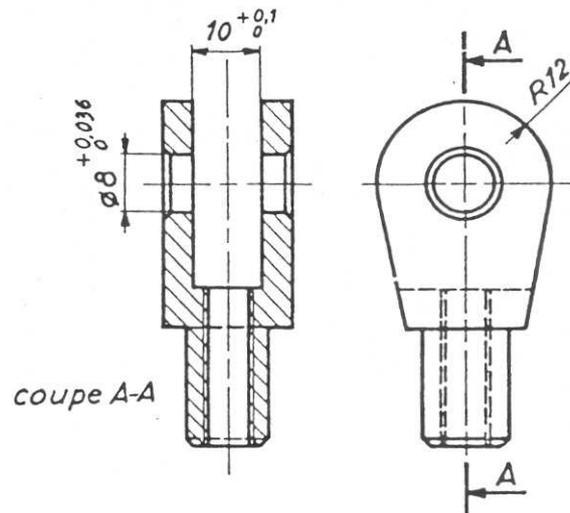
Une chaîne fermée de cotes tolérancées entraîne une cotation surabondante qui crée une cotation ambiguë. L'une des cotes doit être supprimée, pour qu'il n'y ait plus de chaîne fermée.

### *Dimensions fonctionnelles et non fonctionnelles*

La réalisation pratique d'une dimension tolérancée impose à l'ouvrier des vérifications successives qui entraînent invariablement une augmentation du temps d'exécution et du prix de revient de la pièce. Cette constatation nous conduit à ne considérer l'existence d'une dimension tolérancée que si la nécessité de fonctionnement ou de montage l'exige (cas d'ajustement par exemple).

*Exemple* :

La forme supérieure donnée à la chape (voir ci-dessous), dont le rôle est de satisfaire principalement à des exigences d'esthétique est une forme non fonctionnelle. La cote de rayon R12 est une dimension non fonctionnelle.



### *Tolérances et ajustement ISO. Ajustement recommandés.*

#### Qualité

La **qualité** détermine la tolérance de fabrication de l'élément. Chaque qualité est caractérisée par une tolérance fondamentale. La tolérance fondamentale de la qualité de numéro  $n$  est désignée par le symbole  $IT n$  (Intervalle de Tolérance  $n$ ).

Il est prévu 18 qualités numérotées IT 01, IT 0, IT 1 à IT 16 correspondant chacune à des tolérances dites « tolérances fondamentales » dont les valeurs sont données par échelons de dimensions nominales.

A chaque **qualité** et pour une dimension nominale donnée correspond un intervalle de tolérance donnée. L'importance de l'IT croît avec la qualité et pour une même dimension nominale. On peut retenir qu'une variation de 5 dans le degré de qualité correspond, à partir de la qualité 6, à une multiplication par 10 pour l'intervalle de tolérance :

IT 12=10 x IT 7, IT 13=10 x IT 8, ...

Le dessinateur devra se rappeler qu'une diminution de l'IT entraîne un accroissement rapide du coût de production et en tenir compte lors du choix de la qualité demandée.

Pour tenir compte des dispersions croissantes avec la dimension à réaliser et pour un même moyen de production, l'intervalle de tolérance, pour une même qualité, croît avec la dimension nominale.

- Les qualités 01 à 4 sont réservées aux instruments de vérification (cales-étalons, calibres).
- Les qualités 5 et 6 sont réservées à la construction mécanique de grande précision.
- Les qualités 7 et 8 sont réservées à la construction mécanique soignée
- Les qualités 9 et 11 sont réservées à la construction mécanique courante, ordinaire
- Les qualités 12 à 16 sont réservées aux travaux de forge et de mécanique agricole.
- Les qualités 5 à 11 sont généralement les plus employées.

#### Position par rapport à la dimension nominale de l'IT

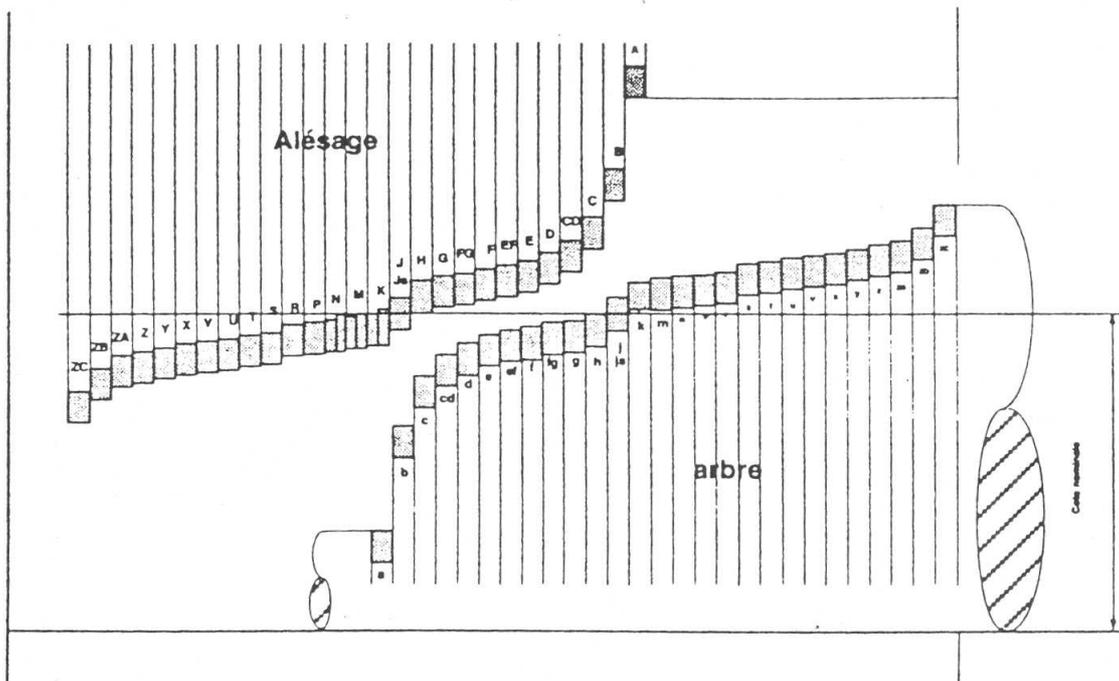
La position de l'IT par rapport à la cote nominale sera donnée par une lettre. Cette lettre sera minuscule s'il s'agit d'un arbre, majuscule pour un alésage.

A chaque position et pour une dimension nominale donnée correspondra un écart fondamental indépendant de la qualité.

L'écart fondamental sera le plus petit, en valeur absolue, des deux écarts définissant l'intervalle de tolérance. Les positions seront les suivantes :

Pour les arbres dont la position est donnée par la lettre	L'écart fondamental sera
a, b, c, cd, d, e, ef, f, fg, g	Écart supérieur
h	Écart supérieur nul
js	IT réparti symétriquement par rapport à la dimension nominale
k, m, n, p, r, s, t, u, v, x, y, za, zb, zc	Écart inférieur
Pour les alésages dont la position est donnée par la lettre	L'écart fondamental sera
A, B, C, CD, D, E, EF, F, FG, G	Écart inférieur
H	Écart inférieur nul
JS	IT réparti symétriquement par rapport à la dimension nominale
K, M, N, P, R, S, T, U, V, X, Y, ZA, ZB, ZC	Écart supérieur

Dans les deux séries de position, les positions a (arbres) et A (alésages) correspondent au minimum de matière pour la pièce.



### **Désignation d'un ajustement normalisé**

Dans l'ordre, la désignation donnera :

- La dimension nominale
- La position de l'IT de l'alésage
- La qualité de l'IT de l'alésage
- La position de l'IT de l'arbre
- La qualité de l'IT de l'arbre

*Exemple :*

#### **65 H8/f7**

- Dimension nominale : 65
- Position de l'IT de l'alésage : H
- Qualité de l'IT de l'alésage : 8
- Position de l'IT de l'arbre : f
- Qualité de l'IT de l'arbre : 7

*Remarque :*

L'ajustement par une seule spécification donne les dimensions tolérancées de 2 pièces. Avec les conditions de fonctionnement et certaines cotes d'encombrement ou de courses d'éléments mobiles, ce seront les seules cotes susceptibles d'apparaître sur le dessin d'ensemble.

### **Système d'ajustements recommandés**

Parmi les divers modes d'application du système de tolérance, il est recommandé d'utiliser soit le *système de l'alésage normal*, soit le *système de l'arbre normal*.

Le système de l'alésage normal est le plus utilisé. Dans ce système, et quelle que soit la position choisie pour l'arbre, la position de l'IT de l'alésage sera toujours H (écart inférieur nul). Moins utilisé, le système de l'arbre normal est tel que, quelle que soit la position choisie pour l'IT de l'alésage, la position de l'IT de l'arbre est h (écart supérieur nul).

### **Écarts pour cotes sans indication de tolérance**

Toutes les cotes et tolérances nécessaires pour assurer l'aptitude à l'emploi, doivent être inscrites sur le dessin. Ces tolérances font foi pour la vérification.

Certaines cotes d'importance secondaire peuvent cependant ne pas comporter de tolérance inscrite, si les variations admissibles par rapport à leurs valeurs nominales sont nettement plus larges que celles correspondant à la dispersion normale des procédés usuels de fabrication.

Dans cette hypothèse, il faut indiquer seulement dans une note générale, l'ordre de grandeur des écarts à l'intérieur desquels devra normalement se situer la fabrication, pour la réalisation de ces cotes non tolérancées.

Sauf indication contraire, les écarts ainsi indiqués ne donnent pas lieu à vérification (sauf à s'assurer, éventuellement par sondage, que cette indication a bien été respectée dans la fabrication).

## Exercices

### Lecture de tolérances

Effectuez les lectures de cotes et tolérances données aux tableaux ci-dessous.

	$30^{+1.0}_{+0.5}$	$80^{+1.3}_{-0.2}$	$150^{-0.2}_{-0.6}$	$65 \pm 1$	$20^{+0.2}_{-0.5}$	$200^{+1.7}_{-1.5}$	$8^{+0.022}_{-0.056}$	$100^{-0.1}_{-0.3}$	$90^{+0.54}_{+0.16}$
Cote nominale									
Ecart inférieur									
Ecart supérieur									
Intervalle de tolérance									
Cote minimale									
Cote maximale									

	40f7	25H9	32K6	50d5	80N13	330c2	110R6	160z11	250A5
Cote nominale									
Ecart inférieur									
Ecart supérieur									
Intervalle de tolérance									
Cote minimale									
Cote maximale									
Autre écriture									

	$55^{-0.06}_{-0.134}$	$12^{+0.051}_{+0.033}$	$320^{+0.057}_0$	$410 \pm 0.2$	$20^{+1.3}_0$	$150^{+0.53}_{+0.28}$	$10^{-0.013}_{-0.017}$	$63^{+0.013}_{-0.006}$	$9^{-0.097}_{-0.133}$
Cote nominale									
Ecart inférieur									
Ecart supérieur									
Intervalle de tolérance									
Cote minimale									
Cote maximale									
Autre écriture									

### Détermination d'ajustements

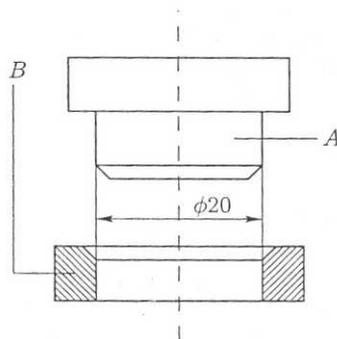
Quels sont les différents ajustements exprimés au tableau suivant ? Indiquez chaque fois s'il s'agit d'un ajustement à arbre normal ou alésage normal et le type de jeu résultant.

	Arbre normal ?	Alésage normal ?	Avec jeu ?		Incertain ?		Avec serrage ?	
			$j_{\min}$	$j_{\max}$	$j_{\min}$	$j_{\max}$	$j_{\min}$	$j_{\max}$
55 H6/n5								
170 H8/k7								
26 M6/h5								
135 G7/h6								
210 H11/h11								
55 F8/h9								
12 H9/e8								
415 H11/c11								
8 H8/p7								
325 H9/js4								
90 H3/js1								
250 P6/h9								
360 N15/s10								
282 A12/z13								
117 G7/h7								
380 D5/p6								
5 M7/m6								
75 JS4/h3								
41 F8/c9								

### Détermination de jeux

Soit à réaliser l'ajustement demandé entre deux pièces A (arbre) et B (alésage) représentés sur la figure 1 ci-dessous. La pièce B a un alésage de diamètre 20 dont l'intervalle de tolérance est défini comme suit :

- Cote maximale= 20.021
- Cote minimale= 20.000



1. Donnez la cotation ISO de cet alésage.
2. Choisissez dans le tableau ci-dessous l'intervalle de tolérance se rapportant au diamètre nominal de la pièce A afin de réaliser dans chaque cas l'ajustement désiré.

- a. Ajustement serrant
- b. Ajustement incertain
- c. Ajustement avec jeu

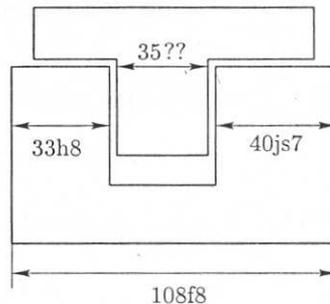
Donnez dans chaque cas la nomenclature ISO du système arbre-alésage ainsi réalisé.

IT	Cote max.	Cote min.
0.013	20.009	19.996
0.033	19.960	19.927
0.013	20.035	20.022

### Dimensionnement d'un arbre

Déterminez les cotes maximale et minimale de l'arbre de manière à obtenir

1. Un serrage minimal de  $200\mu\text{m}$  (qualité 7)
2. Un jeu maximal de  $100\mu\text{m}$  (qualité 5)



### Dimensionnement de soupape

Une des soupapes d'un moteur Diesel de camion a une tige d'un diamètre d'environ  $8\text{mm}$ . Le jeu diamétral entre tige de soupape et guide, nécessaire pour le fonctionnement correct, doit être compris entre  $40\mu\text{m}$  et  $100\mu\text{m}$  environ. Pour des jeux inférieurs à  $40\mu\text{m}$ , la soupape risque de mal se refermer, surtout au démarrage où elle se dilate plus vite que son guide. Au-delà de  $100\mu\text{m}$ , le fonctionnement devient bruyant. La soupape, rectifiée extérieurement, est plus facile à usiner (le guide est réalisé à l'alésoir), et sera donc de meilleure qualité (fabrication précise courante).

1. Dimensionnez l'ajustage de ce système arbre-alésage (soupape-guide) de deux manières :
  - a. Alésage normal
  - b. Arbre normal

et exprimez les résultats en notation ISO

2. Quels sont les jeux maximal et minimal ?

## La sélection de matériaux avec le logiciel CES

Le choix d'un matériau adapté pour un produit est une étape importante lors de sa conception. En fonction des besoins liés aux fonctions du produit, un certain nombre de critères devront être pris en compte. Lorsque ces critères sont établis, il reste à choisir le matériau qui combine les meilleures propriétés possibles.

Le logiciel CES (Cambridge Engineering Selector) a été développé pour assister les concepteurs dans cette tâche. Il regroupe une base de données de plus de 3000 matériaux, avec plusieurs nuances pour chacun. Cette base de données reprend pour chaque entrée de nombreux paramètres, mécaniques, chimiques, électriques, ... De plus, le logiciel reprend des outils afin de comparer et de classer les matériaux entre eux.



### Présentation pour la sélection de matériaux

## Introduction

---

- Nécessité d'un outil de sélection
- Structure des bases de données
- Filtrage : sélection basée sur des contraintes
- Classement : sélection basée sur des objectifs
- Diagrammes de sélection des matériaux
- Cas d'études
- Sélection des procédés

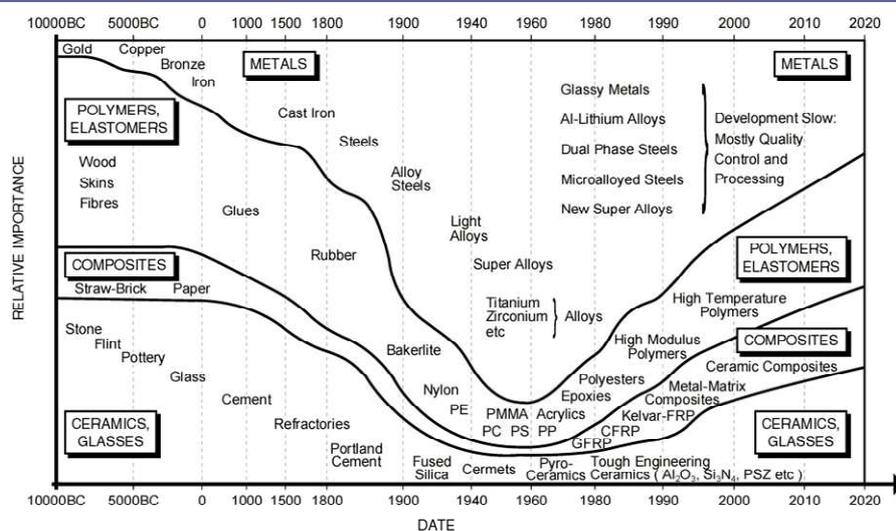
# Nécessité d'un outil de sélection

- Nombre élevé de matériaux disponibles (CES ~ 3000)
- Apparition de nouveaux matériaux
- Innovation :  
grâce aux nouveaux matériaux (compétitivité)
- Volonté de changement

performance  
coût  
sécurité, fiabilité  
différentiation  
écologie

ULB BEAMS

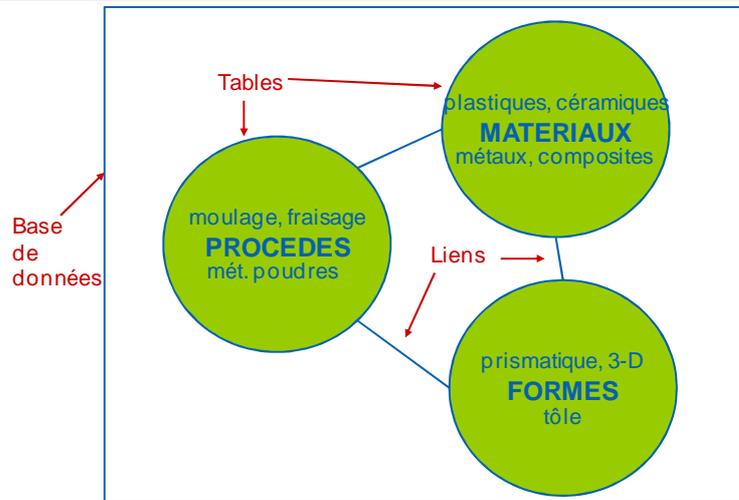
## Evolution historique des matériaux



ULB BEAMS

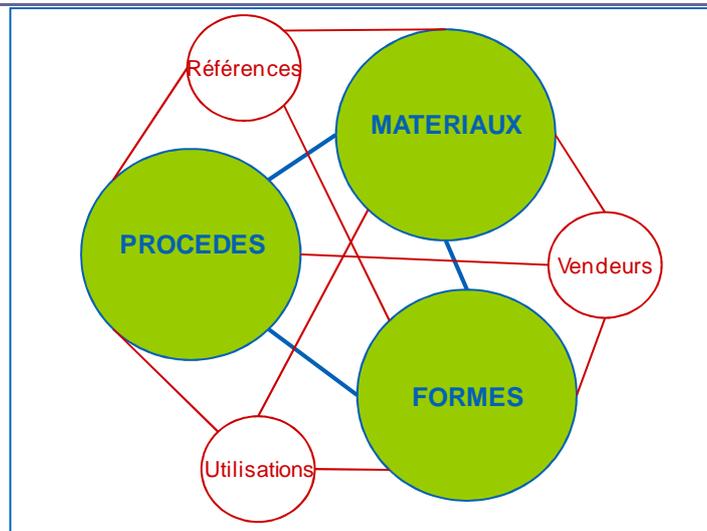
Source: CES lecture notes

## Structure de la base de données 1



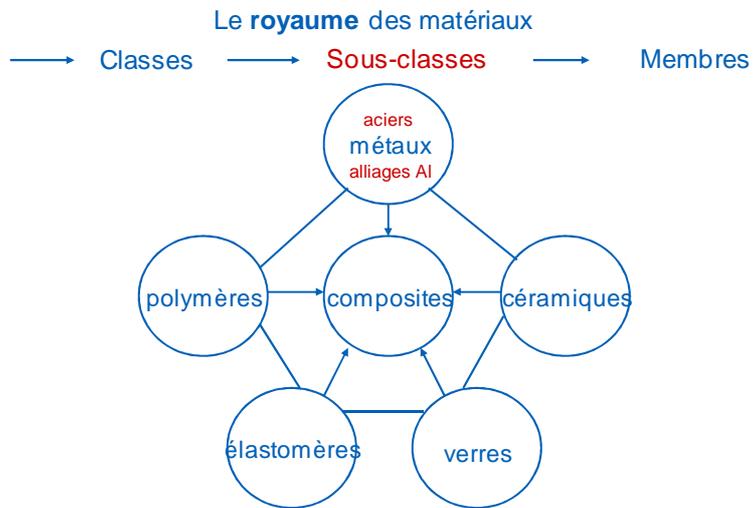
ULB BEAMS

## Structure de la base de données 2



ULB BEAMS

# Matériaux : le menu



ULB BEAMS

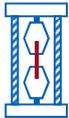
## Structure des données matériaux



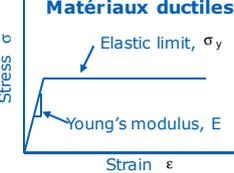
ULB BEAMS

# Propriétés fondamentales des matériaux

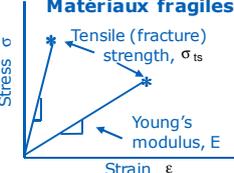
**Propriétés mécaniques**



**Matériaux ductiles**



**Matériaux fragiles**



**General**

Weight: Density  $\rho$ , kg/m<sup>3</sup>  
Expense: Cost/kg  $C_m$ , €/kg

**Mechanical**

Stiffness: Young's modulus  $E$ , GPa  
Strength: Elastic limit  $\sigma_y$ , MPa  
Fracture strength: Tensile strength  $\sigma_{ts}$ , MPa  
Brittleness: Fracture toughness  $K_{Ic}$ , MPa.m<sup>1/2</sup>

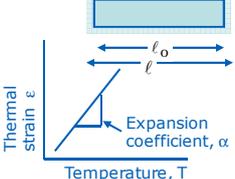
**Thermal**

Expansion: Expansion coeff.  $\alpha$ , 1/K  
Conduction: Thermal conductivity  $\lambda$ , W/m.K

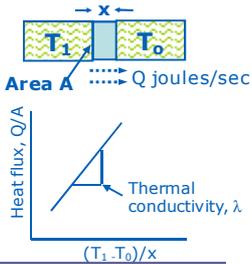
**Electrical**

Conductor? Insulator?

**Dilatation thermique**



**Conduction thermique**



## Propriétés mécaniques

- Module de Young (Young Modulus)
  - GPa
  - Traduit la raideur d'un matériau
  - Voir à ce sujet le document « moduleyoung.pdf »
- Limite élastique (Elastic limit)
  - MPa
  - Contrainte maximale avant déformation plastique
- Ténacité (Fracture toughness)
  - MPa.m<sup>1/2</sup>
  - Propriété d'un matériau de résister à la propagation d'une fissure
  - Voir à ce sujet le document « tenacite.pdf »

# Aide à la décision pour le choix des matériaux



ULB BEAMS

## Filtrage et classement



ULB BEAMS

## Filtrage: « éliminer les matériaux inadéquats »

### Filtrage sur les attributs

ex : tubes échangeurs de chaleur

**Spécifications :**  
 - fonctionner à 100°C  
 - être isolant  
 - conduire la chaleur  
 - être assez solides



**Conserver les matériaux ayant**  
 - température fonctionnement > 100°C  
 - résistivité >  $10^{20} \mu\Omega \cdot \text{cm}$   
 - T-conductivité  $\lambda > 100 \text{ W/m}\cdot\text{s}$   
 - limite élastique  $\sigma_y > 200 \text{ MPa}$

### Filtrage sur les liens

**Spécifications :**  
 - applications mécaniques  
 - être extrudable  
 - être disponible sous forme de I

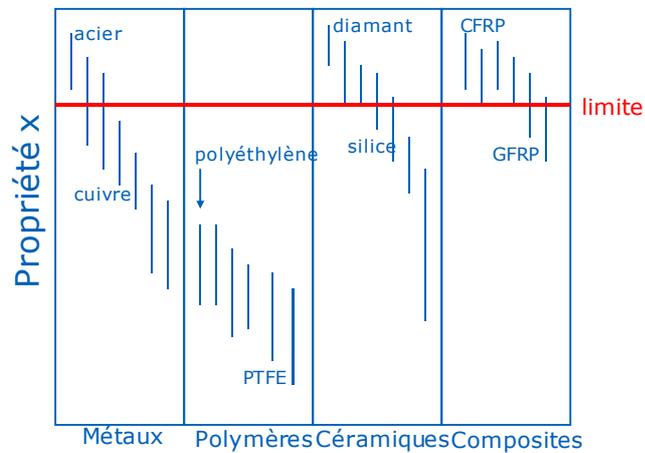


**Conserver les matériaux ayant**  
 - lien vers « utilisation en mécanique »  
 - lien vers « extrusion »  
 - lien vers « section en I »

### Filtrage sur les deux

Attention : la sélection par filtrage **seul** mène souvent à de mauvais choix de matériau !!!

## Filtrage en utilisant les limites des attributs



# Classement « trouver les matériaux les plus adéquats »

## Spécifications de conception



## Identification

Fonction

Que fait la pièce ?

Objectif

Qu'est-ce qui doit être maximisé ou minimisé ?

Contraintes

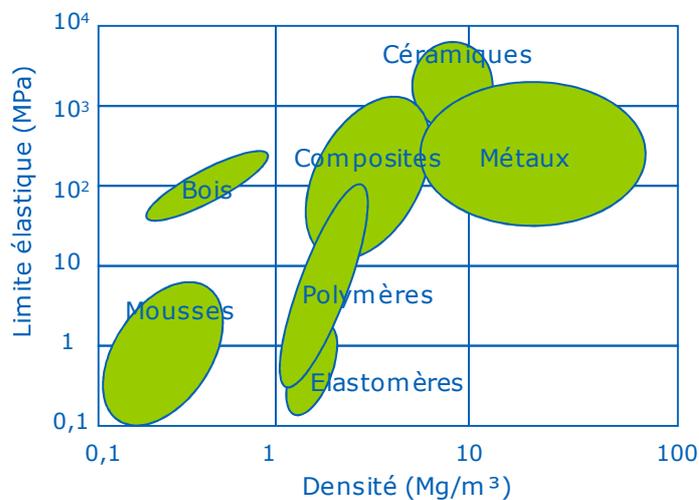
Quelles conditions essentielles doivent être rencontrées ?

Variables libres

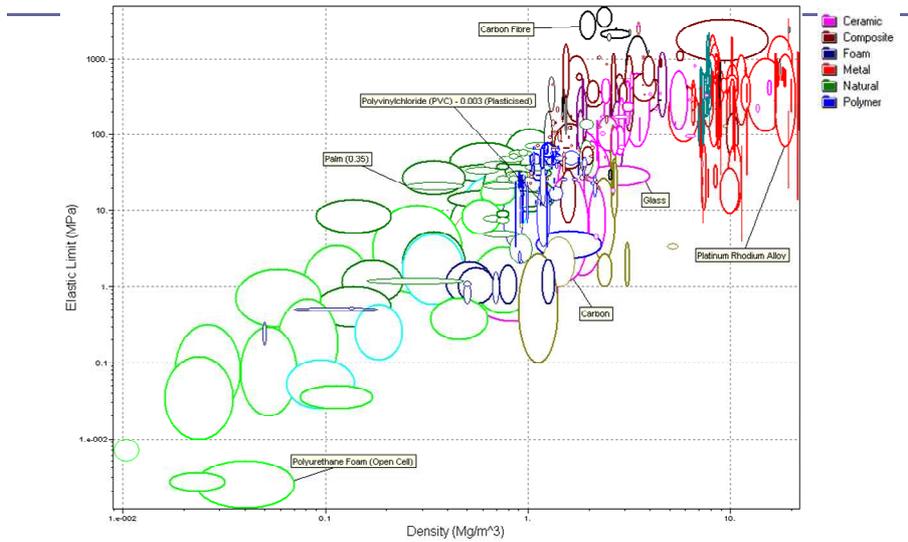
Quelles sont les variables libres ?

- Ecrire l'équation (1) de l'objectif
- Ecrire une équation (2) pour chaque contrainte
- Utiliser la contrainte appropriée pour éliminer la variable libre dans (1)
- Trouver les matériaux qui minimisent (1)

## Diagrammes d'Ashby : le principe



# Diagrammes d'Ashby : la réalité



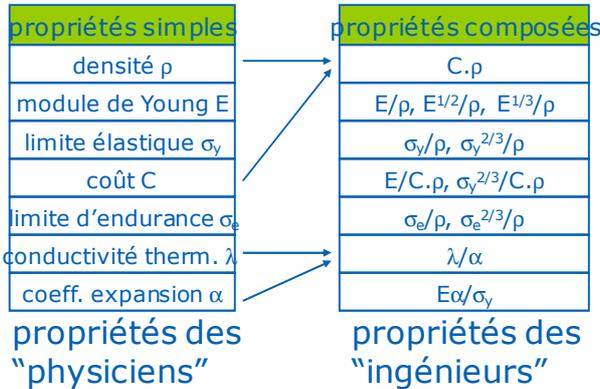
ULB BEAMS

Source: CES lecture notes

## Indice de performance d'un matériau

L'indice de performance représente un **ensemble de propriétés** du matériau.

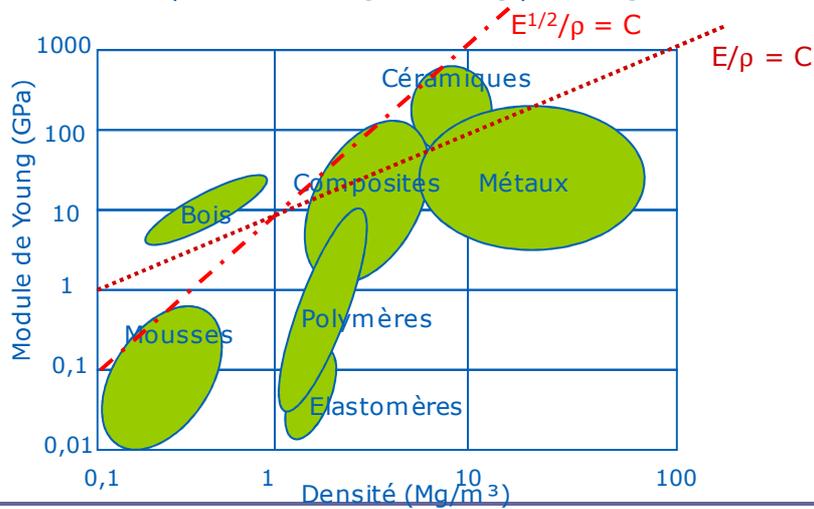
Indice maximisé  $\Rightarrow$  performance maximisée



ULB BEAMS

# Indice de performance dans le diagramme

$$M = E^{1/2}/\rho \Rightarrow \log E = 2 \log \rho + 2 \log M$$



ULB BEAMS

## Exemple : poutre en traction



**Fonction**

poutre en traction

**Objectif**

minimiser la masse  $m$

**Contraintes**

longueur  $L$  spécifiée

ne doit pas céder sous la charge  $F$

**Variables libres**

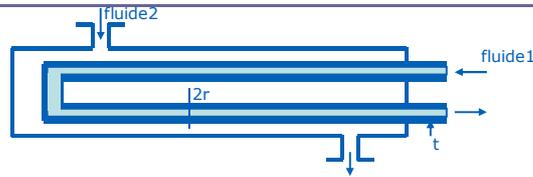
la section  $A$  est libre

- équation (1) de l'objectif :  $m = A \cdot L \cdot \rho$
- équation (2) de contrainte :  $F/A < \sigma_y$
- éliminer variable libre  $A$  dans (1) :  $m = F \cdot L \cdot (\rho/\sigma_y)$
- l'indice de performance à minimiser est  $M = \rho/\sigma_y$

ULB BEAMS

# Cas d'étude 1

Matériau pour échangeurs de chaleur compacts



**Fonction**

transmettre la chaleur du fluide 1 au fluide 2

**Objectif**

maximiser le flux de chaleur /m<sup>2</sup> du tube

**Contraintes**

- 1) doit supporter la différence de pression  $\Delta p$
- 2) température de service maximum  $> 150^{\circ}\text{C}$
- 3) ne doit pas se corroder dans les ions  $\text{Cl}^-$
- 4) disponible sous forme de tube ou de feuille
- 5) le coût entre en considération

**Variables libres**

l'épaisseur du tube  $t$  est libre

ULB BEAMS

# Cas d'étude 1

Matériau pour échangeurs de chaleur compacts

## Modèle

**Objectif**

maximiser le flux de chaleur

$$q = -\lambda \cdot (dT/dx) = \lambda \cdot (\Delta T/t) \quad (\text{J/m}^2 \cdot \text{s})$$

**Contraintes 1**

doit supporter la différence de pression  $\Delta p$

$$\sigma = \Delta p \cdot r / t \leq \sigma_y$$

$$\Rightarrow q = \frac{\Delta T}{\Delta p \cdot r} [\lambda \cdot \sigma_y]$$

**Indice de performance à maximiser :  $M = \lambda \cdot \sigma_y$**

ULB BEAMS

# Cas d'étude 1

Matériau pour échangeurs de chaleur compacts

**FILTRAGE sur :**

- $T_{\max} > 150^{\circ}\text{C}$
- corrosion dans les ions  $\text{Cl}^-$
- forme (tube ou feuille)
- coût

**CLASSEMENT sur :**

$$M = \lambda \cdot \sigma_{\gamma}$$

**Informations complémentaires :**

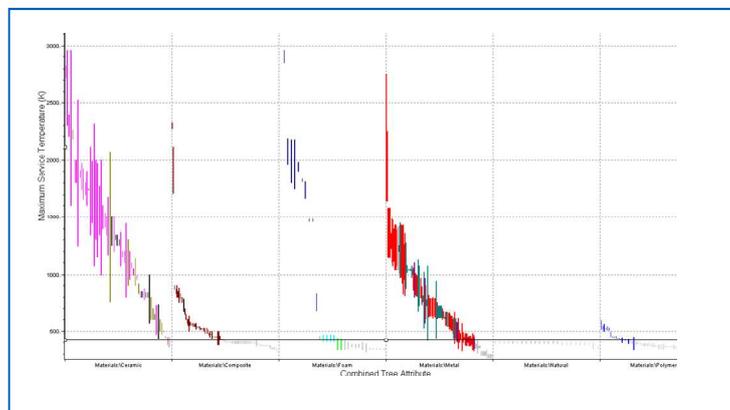
- recherche dans les livres (CD)
- recherche sur le web

ULB BEAMS

# Cas d'étude 1

Matériau pour échangeurs de chaleur compacts

**FILTRAGE:**  $T_{\max} > 150^{\circ}\text{C}$



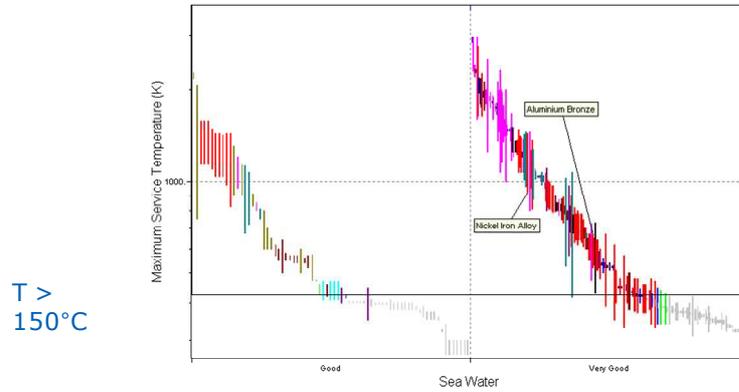
ULB BEAMS

Source: CES lecture notes

# Cas d'étude 1

Matériau pour échangeurs de chaleur compacts

**FILTRAGE:** rés. corrosion = bonne ou très bonne



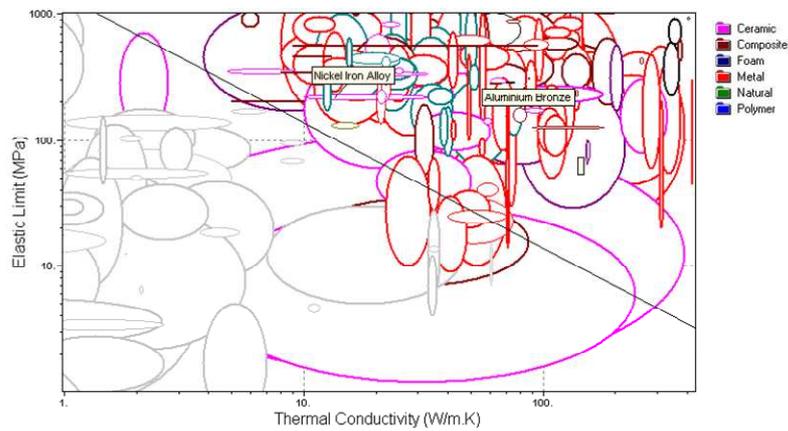
ULB BEAMS

Source: CES lecture notes

# Cas d'étude 1

Matériau pour échangeurs de chaleur compacts

**CLASSEMENT**



ULB BEAMS

Source: CES lecture notes

# Conclusions

---

A vous de jouer !

---

ULB BEAMS

# Conclusions

---

- La sélection implique trois étapes :  
filtrage, classement, recherche d'information
- Une approche systématique reprenant les *limites* spécifiées et le calcul *d'indices de performances* s'applique bien aux problèmes de sélection
- La sélection des matériaux est bel et bien facilitée par l'utilisation d'un logiciel comme CES

---

ULB BEAMS

## Exercices

Sous Win XP, lancez le logiciel CES Edupack 2008.

Sélectionnez le niveau « Français niveau 2 »

### ***Exercice 1 – structure de la base de données matériaux***

Dans la base de données « Univers des matériaux » (subset « All records »), quel est le cheminement dans les classes et sous-classes pour pouvoir observer les attributs du verre de borosilicate ?

Quelle en est la valeur typique du coefficient de dilatation ? de la conductivité thermique ?

### Exercice 2 – Recherche d'attributs

Quel est le module de Young des composites chargés de fibres de verre ? Quelles sont leurs principales utilisations ? Citez les différents procédés de mise en forme des composites.

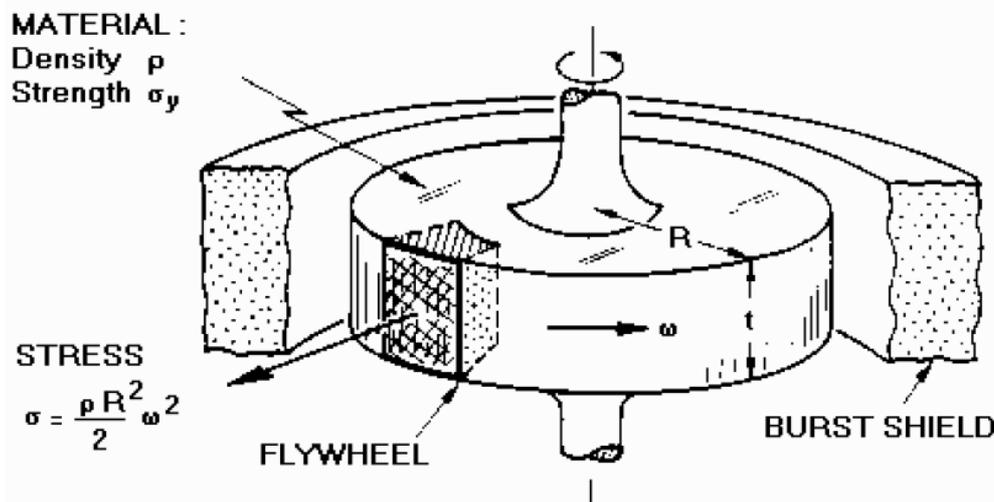
### Exercice 3 – Etape de filtrage

Changez la base de données pour utiliser la base de données de niveau 3 (anglais)

En définissant une nouvelle étape de filtrage (« New Limit Stage »), trouvez les matériaux pour lesquels le module de Young est supérieur à 250GPa, et la masse volumique est inférieure à 2000kg/m<sup>3</sup>.

### Exercice 4 – Choix d'un matériau pour un volant d'inertie

Un volant d'inertie est un disque en rotation servant à conserver de l'énergie



**Fonction :** Conserver un maximum d'énergie cinétique

**Objectif :** Maximiser l'énergie cinétique par unité de masse

**Contrainte :** Ne doit pas « éclater ». La ténacité (« fracture toughness ») doit être adéquate

Energie conservée :  $U = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$

Moment d'inertie :  $J = \pi \cdot \rho \cdot R^4 \cdot \frac{t}{2}$

1. Trouvez l'indice de performance  $M$  qui maximise  $U/m$ .

$R$  et  $\omega$  sont les variables libres.

On utilise la limite élastique  $\sigma_{él}$

2. Créez un nouveau projet dans CES

Conservez « all materials »

3. Créez une nouvelle étape graphique (« Graph Stage »)

Utilisez, dans un diagramme d'Ashby bilogarithmique, les abscisses et ordonnées correspondant à l'indice de performance calculé en 1.

4. Effectuez une sélection rectangulaire (Box selection)

L'abscisse va de 1000 à 10000 dans les unités voulues, l'ordonnée de 100 à 5000.

On élimine ainsi les matériaux ayant des valeurs non adéquates pour ces deux propriétés. Ceci nous donne un ensemble de matériaux plus ou moins valables pour réaliser un volant d'inertie. Il faut encore affiner la recherche.

5. Introduire une droite de pente (Gradient Line Selection) correspondant à l'indice calculé en 1

Les matériaux se trouvant au-dessus de la droite sont ceux qui auront les meilleures performances. Faire passer la droite par (1000,100) et déplacer le curseur au-dessus de la droite pour indiquer que ce sont les matériaux du dessus qui doivent être conservés.

Examiner les matériaux conservés.

On remarque que cette étape n'élimine pas énormément de matériaux. Pour conserver des matériaux ayant de meilleures performances, déplacer la droite en (1000, 500).

Examiner les résultats. On constate qu'un matériau tel que le diamant répond très bien aux critères demandés.

Il va de soi que le prix va devoir intervenir pour éliminer des matériaux tels que le diamant. De plus, certains matériaux retenus ont des faibles valeurs de résistance à la rupture (fracture toughness) et sont susceptibles de casser si la charge est trop importante.

6. Créez une nouvelle étape graphique (bilogarithmique)

Abscisse : ténacité (fracture toughness)

Ordonnée : prix

7. Effectuez une sélection rectangulaire (Box selection)

Ténacité > 15 MPa.m<sup>1/2</sup>

Prix < 15 EUR/kg

8. Examinez les résultats et notez les matériaux conservés après les deux étapes

Le meilleur matériau pour concevoir des volants d'inertie sont les composites polymère/fibre de verre. Observer les attributs de l'Epoxy/glass fiber pour expliquer ses performances.

9. Une autre façon de faire...

Repartir à zéro.

Créez une nouvelle étape graphique.

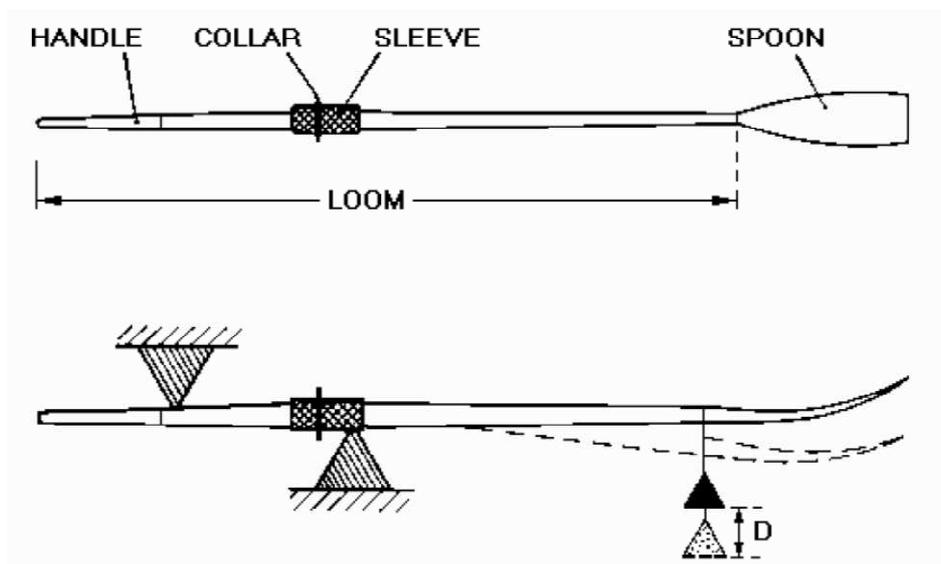
Sur l'axe X : introduire toutes les classes de matériaux, c'est-à-dire : Ceramic, Composite, Foam (mousses), Metal, Natural, Polymer (grâce au bouton Advanced Function)

Sur l'axe Y : générer directement l'expression calculée n 1. On peut placer un titre personnalisé sur cet axe : « strength/weight ratio ».

Effectuez une sélection rectangulaire pour ne conserver que les matériaux dont la valeur en Y est supérieure à 0.2 (dans les unités ad hoc).

### Exercice 5 – Choix d'un matériau pour une rame d'aviron

Une rame doit être légère et suffisamment rigide. La rigidité est mesurée par l'essai représenté à la figure ci-dessous.



**Fonction :** Barre légère et rigide

**Objectif :** Minimiser la masse

**Contrainte :**

- longueur spécifiée
- rigidité spécifiée  $S$  (essai : valeur de  $D$ )
- ténacité  $K_{IC} > 1 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$
- prix  $C_M < 15 \text{€}/\text{kg}$

Soit la rame un cylindre de longueur  $L$  et de rayon  $R$

Rigidité : 
$$S = \frac{CEI}{L^3}$$

Avec :  $C$  : constante indépendante du matériau

$E$  : Module de Young

$I = \frac{\pi R^4}{4}$  (moment d'inertie)

1. Trouvez l'indice de performance  $M$  (croissant) qui minimise la masse  $m$ .

$R$  est la variable libre

2. Créez un nouveau projet CES

Gardez le subset « all bulk materials ».

3. Créez une nouvelle étape graphique

Utilisez, dans un diagramme d'Ashby bilogarithmique, les abscisses et ordonnées correspondant à l'indice de performance calculé en 1.

4. Introduisez une droite de pente correspondant à l'indice calculé en 1

Les matériaux se trouvant au-dessus de la droite sont ceux qui auront les meilleures performances. Faire passer la droite par (1000,7) et déplacer le curseur au-dessus de la droite pour indiquer que ce sont les matériaux du dessus qui doivent être conservés.

5. Pour répondre aux spécifications, créer une seconde étape graphique

Utiliser un diagramme d'Ashby bilogarithmique reprenant les deux contraintes non-encore utilisées et créer une boîte de sélection rectangulaire permettant d'en tenir compte.

6. Visualiser les résultats et tirer les conclusions quant aux matériaux les plus performants.

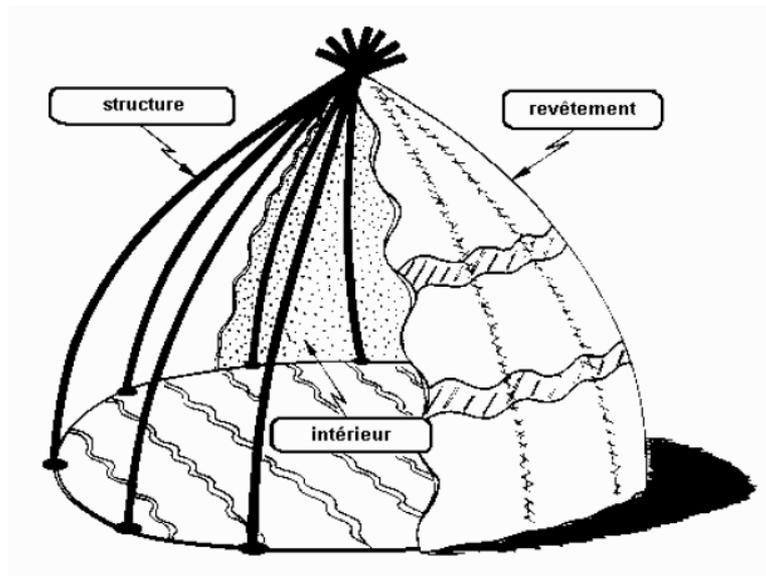
Citer le meilleur matériau répondant le mieux à l'attente et le visualiser dans le premier diagramme d'Ashby (faire un zoom sur la zone contenant ces matériaux).

### ***Exercice 6 – Choix d'un matériau pour la structure des bâtiments***

Les matériaux utilisés pour fabriquer un bâtiment interviennent pour moitié dans le prix de celui-ci. Ils sont utilisés de trois manières :

- dans la structure : pour maintenir le bâtiment
- comme revêtement : pour protéger des intempéries
- à l'intérieur : pour l'isolation thermique, pour la sonorisation, etc.

Les matériaux de la structure doivent être rigides (pas de flexion au gré du vent), résistants (pas de risque d'effondrement) et bon marché. On n'introduit pas de critères comme la résistance à la corrosion car la structure n'est pas exposée à l'environnement extérieur.



**Fonction :** La structure doit supporter les moments de flexion

**Objectif :** Minimiser le coût

**Contrainte :** assez rigide  
assez solide

Les deux indices de performance correspondants aux contraintes sont les suivants :

$$M_3 = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\rho \cdot C_m} \text{ et } M_4 = \frac{\sigma_c}{\rho \cdot C_m}$$

Le premier correspond à la rigidité et le second à la solidité de l'édifice (résistance à l'effondrement axial).  $E$  est le module de Young,  $\rho$  est la masse volumique,  $C_m$  le prix par unité de masse et  $\sigma_c$  la résistance à la compression (compressive strength).

1. Créez un nouveau projet dans CES

Choisissez le subfield « all bulk materials »

2. Créez une nouvelle étape graphique

Utilisez, dans un diagramme d'Ashby bilogarithmique, les abscisses et ordonnées nécessaires pour l'indice de performance.

3. Introduisez une droite de pente correspondant à l'indice  $M_3$

Sélectionnez les matériaux situés au-dessus du point (1000,20) (dans les unités ad hoc). Que vaut l'indice de performance des matériaux situés sur cette droite ?

4. Créez une nouvelle étape graphique

Utilisez, dans un diagramme d'Ashby bilogarithmique, les abscisses et ordonnées nécessaires pour l'indice de performance  $M_4$ .

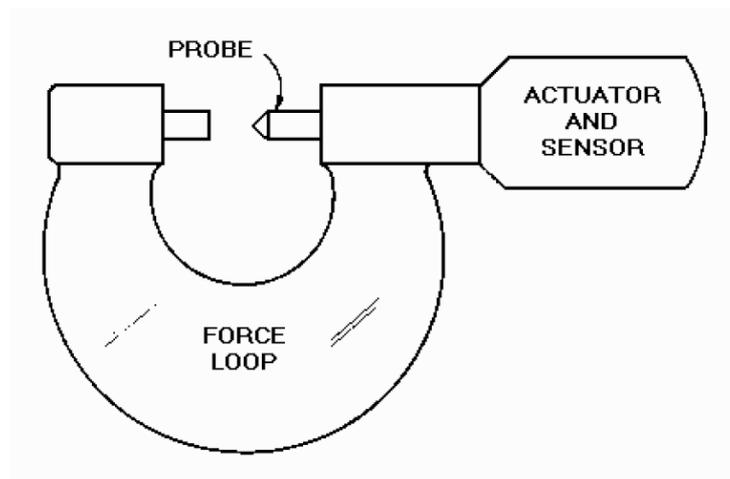
5. Introduisez une droite de pente correspondant à l'indice  $M_4$

Sélectionnez les matériaux situés au-dessus du point (1000,530) (dans les unités ad hoc). Que vaut l'indice de performance des matériaux situés sur cette droite ?

6. Quels sont les matériaux qui conviennent pour construire de telles structures (intersection des deux étapes) ?

### Exercice 7 – Matériau pour dispositif de mesures de précision

La précision d'un dispositif de mesure (comme la jauge de déplacement d'un micromètre) est limitée par sa rigidité et par les changements dimensionnels dus aux gradients de température. La sensibilité aux vibrations est également problématique.



**Fonction :** Boucle de force (force loop) pour un instrument de précision

**Objectif :** Maximiser la précision de position (minimiser la distorsion)

**Contrainte :** -doit tolérer les flux de chaleur  
-doit tolérer les vibrations  
-ne doit pas être trop coûteux

Considérons la distorsion d'une poutre causée par un flux de chaleur  $q$  sur une de ses faces :

Soit  $q$  le flux de chaleur. La loi de Fourier (unidirectionnelle, état stable) nous donne son expression,  $\lambda$  étant la conductivité thermique :

$$q = -\lambda \frac{dT}{dy}$$

La déformation thermique est exprimée par ( $\alpha$  étant le coefficient d'expansion thermique) :

$$\varepsilon = \alpha(T_0 - T)$$

Le gradient de température crée un gradient de déformation  $d\varepsilon/dy$ . Ceci implique une courbure de la poutre.

$$K = \frac{d^2u}{dx^2} = \frac{d\varepsilon}{dy}$$

1. Pour une géométrie et un flux donnés, on peut déduire de cette dernière relation l'indice de performance  $M_1$  (croissant) minimisant la courbure due à des gradients de température
2. Pour obtenir une faible sensibilité aux vibrations, il s'agit de maximiser l'indice de performance  $M_2 = E^{1/2}/\rho$
3. En utilisant respectivement deux étapes graphiques, sélectionnez les matériaux appropriés

$M_1 > 4 \text{ (Wm}^{-1}\text{)}$  (distorsion thermique)

$M_2 > 0.003 \text{ (GPa)}^{1/2}/(\text{kg/m}^3)$  (vibrations)

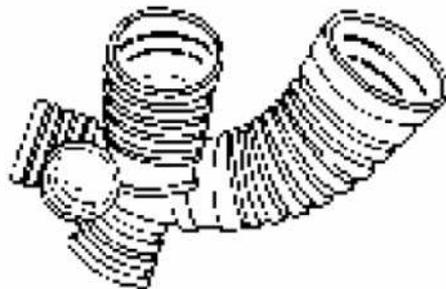
Visualisez, dans les matériaux conservés, ceux qui répondent le mieux à l'une puis à l'autre de ces contraintes. Comparez le diamant et les alliages de beryllium.

4. Refaire la sélection en portant le prix par unité de masse en abscisse et un indice global, construit à partir de  $M_1$  et  $M_2$ , en ordonnée.

### **Exercice 8 – Sélection de procédés : tuyau de collecteur**

Nous allons dans cet exemple chercher non plus le matériau adéquat pour une application donnée, mais le procédé de fabrication adéquat pour une série de pièces.

On cherche le procédé de fabrication optimal pour fabriquer un ensemble de tuyaux collecteurs faisant partie du système de propulsion de véhicules spatiaux. Les tuyaux doivent être en nickel. Ils sont grands, pèsent environ 7 kg, et leur forme générale est très compliquée ; elle est creuse avec des éléments transverses. L'épaisseur minimale de la section est entre 2 et 5 mm. La tolérance à la fabrication demandée est stricte pour une pièce de cette taille : 0.1 mm. La taille du lot de fabrication est faible vu l'application : 10 pièces. On demande de plus un bon état de surface. La rugosité doit être inférieure à 10  $\mu\text{m}$ . Il s'agit d'une première étape de fabrication.



1. Créez un nouveau projet
2. Sélection en quatre étapes

Toutes les étapes de sélection de cet exemple sont des étapes graphiques. La sélection peut se faire de plusieurs manières. Les étapes sont des étapes suggérées. Vous n'êtes nullement tenus de procéder comme suit.

La première étape consiste à visualiser les tolérances normales de fabrication pour les procédés dits primaires (première étape de fabrication, Primary). Utilisez la loupe et la boîte de sélection pour faire un premier filtrage.

La seconde étape consiste à présenter la masse des pièces fabriquées en fonction du matériau de fabrication. L'axe X sera le matériau. Utilisez une sélection avancée (bouton advanced), et cliquez

(une fois) dans l'arborescence jusqu'à obtenir les alliages non ferreux. Double-cliquez alors sur ces alliages non ferreux, et constatez que la requête de sélection (query) s'affiche dans la boîte de texte. Le titre de votre axe X sera Material Class par exemple. Utilisez la loupe et la boîte de sélection pour sélectionner les enregistrements entre 5 et 10 kg environ.

La troisième étape s'adresse à la forme et à la section (normale) de la pièce. L'axe X sera une sélection avancée de la forme. On cherche une forme de type 3-D, avec des cavités (Hollow), et des éléments transverses complexes. Donnez comme titre de l'axe Shape Class par exemple. Utilisez la boîte de sélection pour garder les procédés de fabrication permettant des sections entre 2 et 5 mm environ.

La dernière étape de sélection prend en compte un critère économique au travers du lot de production. On présentera donc la taille du lot (Economic Batch Size) pour les procédés de type discret (Discrete). Conservez les procédés convenant pour des lots d'environ 10 pièces.

### 3. Résultats

Visualisez les résultats de votre sélection (View Results ou bouton dans la barre d'outils).

Double-cliquez sur les enregistrements présentés et lisez les caractéristiques des procédés candidats pour affiner encore votre sélection.

### **Exercice 9 – Sélection de procédés : le pot de yaourt**

Les pots de yaourt sont fabriqués en polystyrène ou en polyéthylène (ce sont des polymères thermoplastiques). Leur section varie entre 0.5 et 1mm. Ils pèsent environ 10 grammes. La forme du pot peut s'exprimer de deux manières : pièce 3-D avec un creux, ou alors pièce d'une pièce tridimensionnelle obtenue à partir d'une feuille (dished). Le pot doit être obtenu en une seule opération pour que sa fabrication soit économique, et présenter un très bon état de surface pour être agréable au toucher (rugosité  $< 5 \mu m$ ). Les parois sont très minces par rapport au volume du contenant. Le rapport d'aspect (aspect ratio) est supérieur à 100. Les lots de pièces sont importants car le produit est fabriqué en grandes séries.



Sans tenir compte de la taille des lots de production, quels sont les procédés de fabrication qui conviennent ? Parmi ceux-ci, lesquels sont les mieux adaptés. Pourquoi certains d'entre eux ne conviennent-ils pas ? Augmentez peu à peu la taille des lots, et vérifiez que certains procédés ne sont plus adaptés. Vérifiez chaque fois que vous n'êtes pas dans un cas exceptionnel où le rejet d'une solution n'est ici pas pertinent. Est-il possible de rejeter certains procédés proposés autrement que sur base du lot de production ?

## Partie 3 : Travaux pratique

### Introduction à la métrologie des longueurs et les outils de mesure utilisés au laboratoire

#### Généralités

##### *Les étalons de mesure*

En métrologie industrielle des longueurs, les étalons de mesure sont les cales-étalons, le plus souvent constituées par de petits blocs d'acier ou de céramique, présentant deux surfaces parfaitement planes et parallèles dont la distance matérialise la cote gravée.

La combinaison d'éléments de longueur différente permet de réaliser, avec une très grande précision, une importante quantité de cotes. Ce principe d'empilage exige cependant pour être précis des qualités bien déterminées de la part de chaque cale-étalon. Nous passerons ces qualités brièvement en revue ci-dessous.

##### *Planéité et parallélisme*

La planéité et le parallélisme des faces définissant la cote doivent évidemment être aussi parfaits que possible. C'est d'ailleurs grâce à la qualité de la planéité que l'on obtient une bonne adhérence lors de l'empilement de diverses cales, cette adhérence étant une résultante de l'attraction moléculaire.

##### *Cote nominale*

La cote nominale d'une cale étalon est toujours garantie à la température de 20°C. La différence entre cette cote et la distance entre deux points quelconques des surfaces mesurantes est normalisée suivant les qualités des cales-étalons. Ainsi, elle ne peut dépasser, si  $L$  est la cote nominale :

- Pour la qualité « référence » :  $\pm(0,05 + L[mm]10^{-6})\mu m$
- Pour la qualité « précision » :  $\pm(0,1 + 2 L[mm]10^{-6})\mu m$

##### *Dureté et stabilité*

La dureté, ou plutôt la résistance à l'usure des surfaces mesurantes d'une cale-étalon est un gage de longévité de celle-ci. Aussi, les cales-étalons sont-elles construites dans des aciers de qualité ayant subi une suite de traitements thermiques tout à fait spéciaux. Ces traitements doivent en outre être suivis de traitement de stabilisation artificielle.

##### *Dilatation thermique*

Comme indiqué ci-dessus, la cote nominale d'une cale-étalon est garantie à 20°C. Le coefficient de dilatation thermique, variable selon la qualité des aciers utilisés, est en général précisé par le constructeur des cales-étalons. En moyenne, il vaut environ 10 $\mu m$  par mètre et par degré centigrade, ce qui correspond par exemple pour des conditions de travail à l'atelier pour la construction du calibre-tampon à :

$$L=20mm \quad t=25^{\circ}C \quad \Delta L=1\mu m$$

##### *La pression de mesure*

La pression de mesure est un des facteurs essentiels qui conditionnent la précision d'une mesure. En effet, la pression de mesure doit être suffisante pour assurer le contact entre la pièce et les touches

de mesure de l'appareil, mais elle ne doit pas être trop élevée au risque de déformer soit la pièce, soit l'appareil de mesure lui-même, soit encore le support de cet appareil. On limitera à cet effet les forces de contact à quelques centaines de grammes.

Comme nous le verrons ci-dessous, les divers types d'appareils de métrologie des longueurs ne sont pas équivalents au point de vue de la pression de mesure, les meilleurs étant ceux qui assurent une pression de contact constante.

### **Les appareils de mesure**

Il existe de nombreux types d'appareils de mesure de longueur utilisables en atelier ou en laboratoire de métrologie. Chaque type ayant sa sensibilité, sa fidélité et sa justesse propre et faisant appel à un moyen particulier d'amplification. On peut cependant les classer dès l'abord en deux catégories :

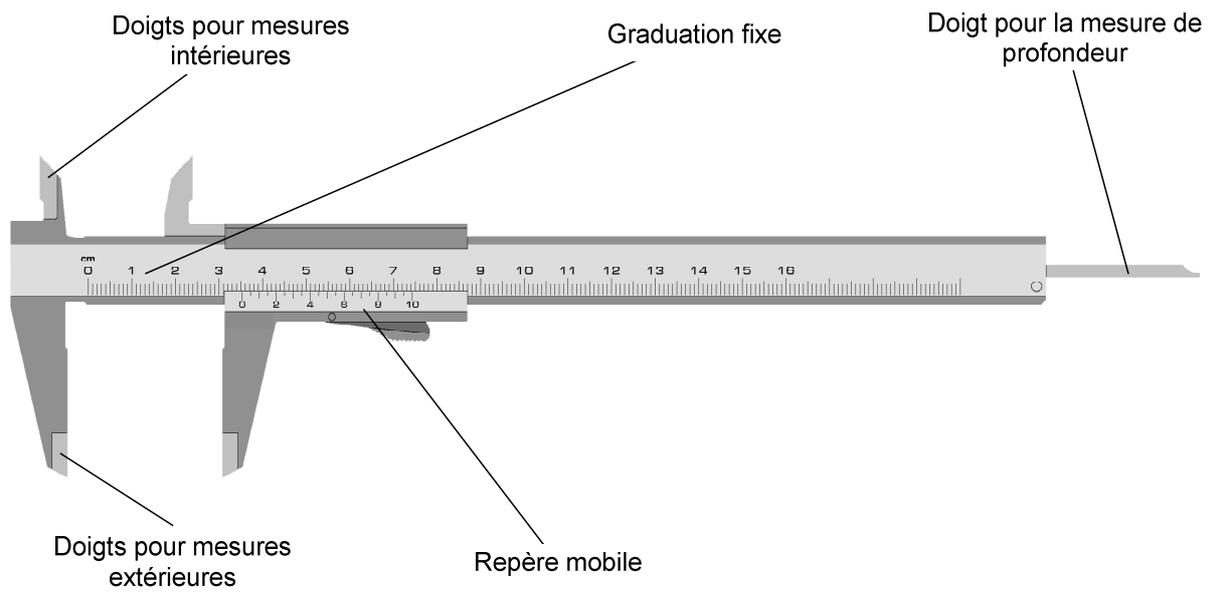
- Les appareils de mesure absolus qui indiquent immédiatement la longueur cherchée, comme par exemple le pied à coulisse, le palmer ou le mesureur de Abbe,
- Les appareils de mesure relatifs, qui indiquent la longueur cherchée par rapport à une graduation zéro arbitraire, comme par exemple les comparateurs mécaniques ou pneumatiques.

Les appareils absolus comportent donc leur propre étalonnage, les appareils relatifs comportent également leur propre étalonnage mais pour pouvoir délivrer une mesure absolue, leur zéro doit être repéré et réglé, par exemple à l'aide d'une cale étalon.

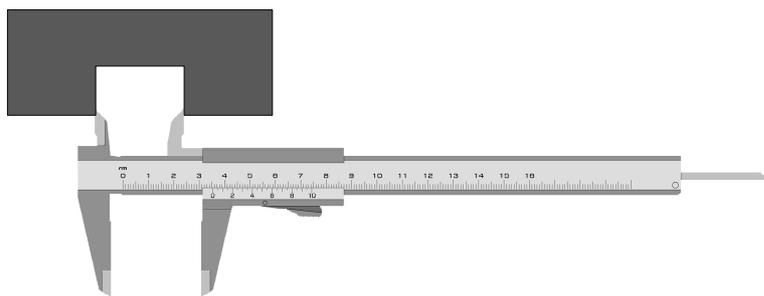
Nous nous bornerons ci-dessous à décrire les quelques appareils de mesure de longueur qui seront utilisés à l'atelier.

#### ***Le pied à coulisse***

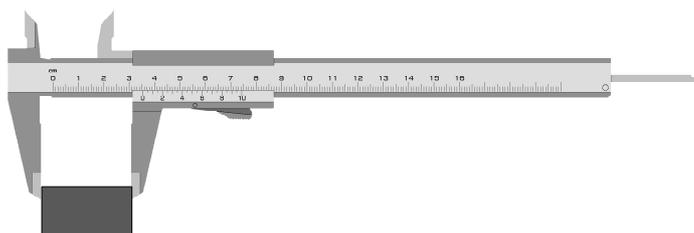
Le pied à coulisse est un instrument de mesure permettant de mesurer des distances absolues. Il est généralement constitué de deux séries de doigts : une série pour la mesure de cotes extérieures et une série pour la mesure de cotes intérieures. Un des doigts est mobile et peut coulisser sur le système. La graduation principale se trouve sur la partie fixe, et le repère se trouve sur la partie mobile.



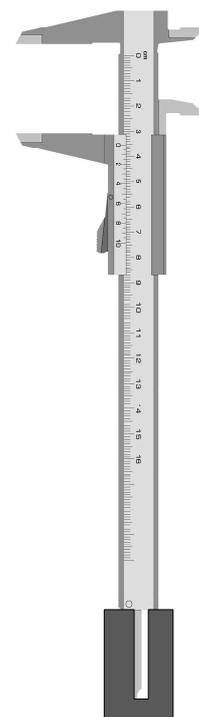
Il est également possible de faire des mesures de profondeur.



Mesure de cotes intérieures



Mesure de cotes extérieures

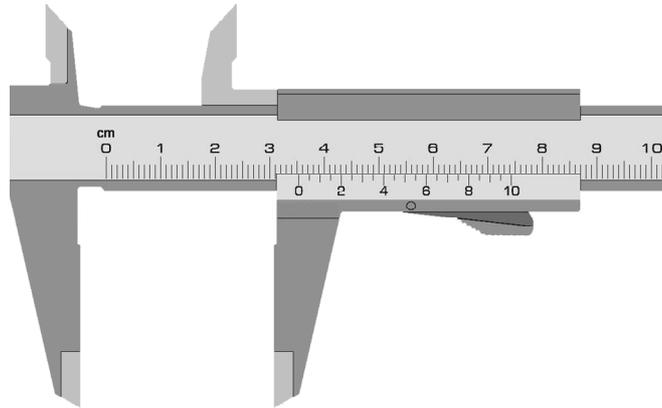


Mesure de profondeur

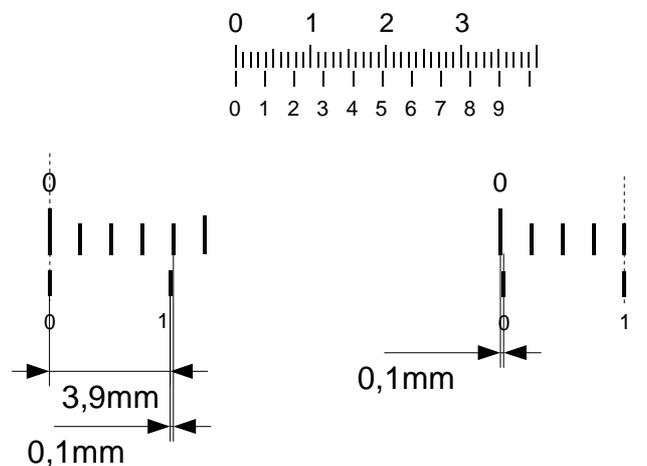
La mesure est indiquée par la position du trait du 0 de la partie mobile sur la partie fixe.

## Le vernier

La plupart du temps, le dispositif est équipé d'un dispositif à double graduation appelé vernier (du nom de son inventeur Pierre Vernier). Ce dispositif permet d'augmenter la résolution de l'appareil de mesure.



La seconde règle, située sur la partie mobile, possède 10 graduations pour une longueur totale de 39mm. Ainsi, la distance entre deux graduations de la partie mobile est de 3,9mm. Dès lors, si le trait du chiffre 1 du repère mobile coïncide avec le trait correspondant à 4mm sur la partie fixe, le repère du 0 de la partie mobile s'est décalé de 0,1mm. Si le trait du chiffre 2 de la partie mobile correspond au trait de 8mm sur la partie fixe, le repère du 0 de la partie mobile s'est décalé de 0,2mm. Et ainsi de suite. Chaque fois qu'un repère  $x$  de la partie mobile coïncide avec un repère de la partie fixe, le 0 de la partie mobile s'est décalé de  $x$  fois 0,1mm.

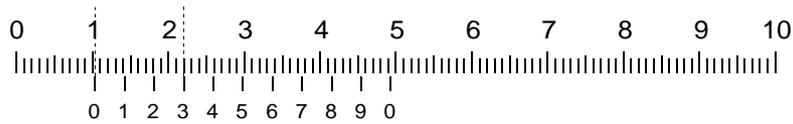


En pratique, pour lire la mesure, il faut donc :

- Regarder la graduation sur la partie fixe située juste à gauche du 0 de la partie mobile
- Regarder ensuite quelle est la graduation  $x$  de la partie mobile qui est exactement en face d'une graduation de la partie fixe. Il faut ajouter  $x$  fois 0,1mm à la lecture sur la règle mobile.

Il existe également des verniers qui ont plus de 10 graduations, permettant d'encore augmenter la résolution de l'appareil.

Exemple :



- Le 0 de la partie mobile est à droite de la graduation de 10mm sur la partie fixe
- Parmi toutes les graduations de la partie mobile (du bas), c'est le 3 qui est aligné avec un trait de la partie fixe (du haut), ce qui correspond à 0,3mm
- La distance mesurée est donc  $10\text{mm}+0,3\text{mm}=10,3\text{mm}$

### Pieds à coulisse numériques

Certains appareils possèdent une lecture numérique. La lecture est alors directe. Il faut cependant faire attention à la remise à zéro du dispositif : un bouton permet en effet de remettre la lecture à zéro sur la position courante, ce qui permet de mesurer par exemple des incréments de longueur. Il faut donc bien vérifier à chaque utilisation si l'appareil affiche bien 0 lorsque les deux doigts de mesures sont en contact, et si nécessaire faire la remise à zéro.

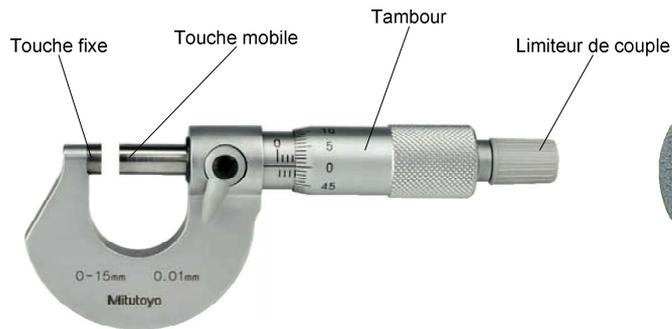
Notez également que certains appareils peuvent afficher des mesures en millimètres et en pouces. Le changement peut se faire par simple pression sur un bouton. Il est évidemment important de vérifier que les unités affichées sont bien celles souhaitées.

### Résolution de la mesure

Même si la résolution affichée par les pieds à coulisse numérique est au centième de millimètre, il est préférable de ne considérer que le dixième de millimètre comme valeur significative. En effet, la pression exercée lors de la mesure par les doigts du pied à coulisse sur la pièce n'est pas calibrée, et celle-ci peut avoir une influence en-deçà du dixième de millimètre.

### *Le micromètre, ou palmer*

Le micromètre est un instrument de mesure de distances absolues. Il est généralement constitué d'une touche (doigt) fixe et d'une touche mobile, déplacée par la rotation d'une vis micrométrique. Chaque rotation complète de la vis micrométrique produit une translation donnée par le pas de la vis, généralement 0,5mm.



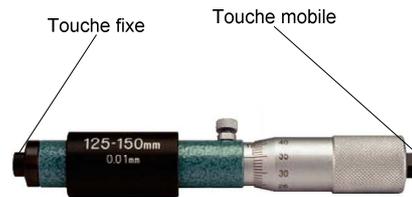
Micromètre externe



Micromètre externe à trois touches



Micromètre de profondeur



Micromètre intérieur

*Vue de différents types de micromètres (source : Catalogue Mitutoyo)*

La position de la partie mobile est repérée par deux graduations. D'une part, le déplacement de la partie mobile le long de l'axe de la touche est gradué au pas de la vis. D'autre part, le tambour de la vis est également muni d'une graduation augmentant la résolution. Ainsi, si le tambour est muni de 50 graduations et que le pas de la vis est de 500 $\mu$ m, la distance entre chaque trait correspond à 1 centième de millimètre.

Cet appareil se décline en plusieurs variantes, permettant de faire des mesures intérieures, extérieure, des mesures de diamètre intérieur, ou encore de profondeur.

Les palmers sont équipés d'un limiteur de couple. Ainsi, lors de la mesure, il convient de toujours serrer la vis micrométrique à l'aide du limiteur de couple, ce qui assure d'appliquer toujours les mêmes contraintes mécaniques sur les touches du comparateur, et d'assurer une meilleure reproductibilité des mesures, indépendantes de la force exercée par l'utilisateur.

Une précision de mesure au centième de millimètre est donc possible.

Un exemple de lecture est donné ci-dessous :



Sur la ligne principale, on voit que le tambour a légèrement dépassé le repère de 15,5mm. La graduation du tambour, qui offre ici une résolution de 20 $\mu$ m (25 graduations sur le tambour) croise la ligne principale sur le repère 14. La mesure vaut donc ici 15,64mm.

Comme pour les pieds à coulisse, des versions numériques existent, permettant des lectures plus rapides. Il est important ici aussi de vérifier que la remise à zéro du dispositif a été correctement faite.

### **Le comparateur**

Le comparateur est un instrument de mesure relatif. Il est généralement constitué d'une touche, qui peut translater le long d'un axe. Le mouvement de translation est amplifié par un système de démultiplication mécanique, et actionne la rotation d'une aiguille sur le cadran. L'utilisation se fait donc généralement pour mesurer une différence de niveau entre deux points, le comparateur étant fixé sur un support. Ce support constitue un élément à part entière de la chaîne de mesure, et devra être suffisamment rigide pour ne pas se déformer sous l'action de la pression de mesure.

La résolution de la mesure est en général inférieure au centième de millimètre, les meilleurs pouvant atteindre le micromètre.

La pression de contact est assurée par un ressort, ce qui constitue un défaut de ce type d'instrument puisque celle-ci dépendra de la compression du ressort, donc de la position de la touche.



*Exemple d'un comparateur analogique (source : Catalogue Mitutoyo)*

Des versions numériques de ce type d'instrument existent. La mesure peut alors être faite par un capteur inductif.

### **Les erreurs de mesure**

Les considérations émises ci-dessus montrent que la précision d'une mesure, simple par ailleurs, suppose la réalisation de condition très diverses. Aussi pratiquement y aura-t-il toujours un écart entre le résultat de la mesure et sa vraie valeur. Cet écart constitue l'erreur qui en toute généralité comporte une part systématique et un part aléatoire.

### Erreurs systématiques

Si l'on exclut les fautes grossières de mesure, les erreurs systématiques résultent des effets de causes qui agissent en permanence et de la même façon. Citons par exemple comme cause d'erreurs systématiques :

- Un écart des cales étalons par rapport à leur cote nominale
- Un effet de la température
- Un défaut de construction de l'appareil de mesure
- Une déformation des supports d'appareils

Toutes ces erreurs systématiques peuvent être annulées soit en introduisant les facteurs de correction adéquats, soit en procédant à l'étalonnage du système de mesure à l'aide d'un appareil étalon de référence.

### Erreurs aléatoires

Il est un fait expérimental qu'une fois les erreurs systématiques disparues, les mesures faites avec un appareil dans des conditions apparemment identiques restent sujettes à variations.

Ces variations proviennent de causes perturbatrices rarement bien explicitées, agissant au hasard dans un sens ou dans l'autre. Aussi, en métrologie de précision, on prendra l'habitude d'effectuer non pas une seule mesure mais bien une série de mesures de la grandeur à qualifier. Dès lors, une fois les erreurs systématiques éliminées, le problème se pose de choisir, parmi la série de mesures, celle que l'on considérera comme une très bonne approximation de la vraie valeur de la grandeur recherchée, tout en sachant quelle est la confiance que l'on peut avoir dans cette approximation.

Les erreurs aléatoires agissant au hasard, la recherche d'une vraie valeur s'effectuera par la théorie du calcul des probabilités dont nous rappellerons ci-dessous quelques notions.

### Loi de distribution normale

Considérons une population formée par N mesures d'une grandeur x, soient :  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$  N étant supposé un grand nombre. On peut caractériser cette population par les divers critères suivants :

- Moyenne arithmétique :  $\bar{x} = \sum_i \frac{x_i}{N}$
- Variance :  $s^2 = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{N}$
- Ecart-type :  $s = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{N}}$

En pratique, la distribution des valeurs  $x_i$  est le plus souvent normale ou gaussienne, c'est-à-dire que le diagramme des fréquences de cette distribution (nombres de valeurs de  $x_i$  comprises dans un intervalle donné en fonction de cet intervalle) peut être représenté par une courbe en cloche de Gauss dont l'équation est bien connue.

La loi normale peut être tabulée. On trouvera dans le tableau ci-dessous les valeurs des fréquences relatives  $f_r$  correspondant à cette loi pour diverses valeurs de la variable réduite :  $\frac{(x - \bar{x})}{s}$

$\frac{(x - \bar{x})}{s}$	0,68	1,00	1,96	2,00	2,58	3,00	3,29	3,89
$F_r$ [%]	50,00	68,27	95,00	95,45	99,00	99,73	99,90	99,99

Ainsi, avec une probabilité de 99% ou si l'on préfère avec un risque d'erreur de 1%, la vraie valeur de  $x$  sera égale à  $\bar{x} \pm 2,58s$ .

### Le contrôle de géométries

Signalons qu'afin de vérifier si l'exécution d'une pièce est conforme au plan, la mesure de longueur n'est pas toujours suffisante. Il y a lieu de vérifier dans certains cas également les qualités d'exécution de géométries, telle que la planéité d'une face, le parallélisme de deux faces, la circularité d'un trou, ... Ce genre de mesure peut se faire par exemple à l'aide de projecteurs de profils, ou de machines à mesurer tridimensionnelles.

Les projecteurs de profils permettent d'avoir une projection 2D agrandie d'une partie de la pièce. Cette projection peut ensuite être comparée à des géométries connues, afin de contrôler si les tolérances sont vérifiées.

Les machines à mesurer tridimensionnelles sont en général des portiques à 3 degrés de liberté, pouvant éventuellement être motorisés. La pièce est posée sur le marbre de la machine, et un palpeur est amené en contact avec la pièce à différents endroits. La machine enregistre alors la position du palpeur lors du contact, ce qui permet d'obtenir les coordonnées du point de contact. En palpant la pièce à différents endroits, il est possible de contrôler l'exactitude de géométries. Par exemple, en palpant plusieurs points d'un alésage, il est possible de vérifier sa cylindricité.

### Le contrôle de l'état de surface

En fonction des opérations d'usinage effectuées, l'état de surface d'une pièce peut être très différent, allant d'une surface très rugueuse pour un brut de sciage, jusqu'à une surface très lisse pour un fini en poli miroir.

La définition de l'état de surface peut être faite en tenant compte de la longueur caractéristique d'une oscillation du profil de la surface de la pièce. La rugosité est définie par la répétition d'un motif, laissé par exemple par l'outil utilisé pour l'usinage de la face, et qui présente une distance entre deux répétitions qui comprise en  $2\mu\text{m}$  et  $500\mu\text{m}$  à  $800\mu\text{m}$ .

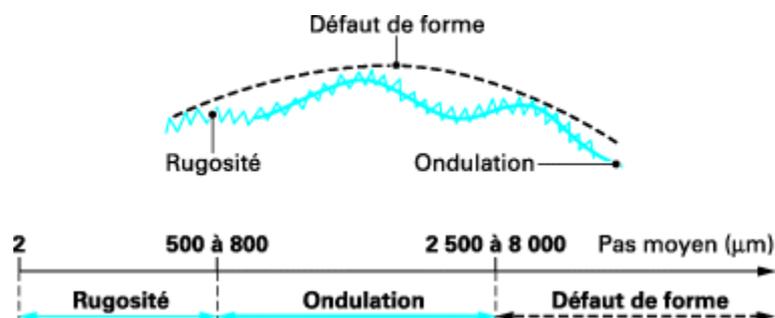
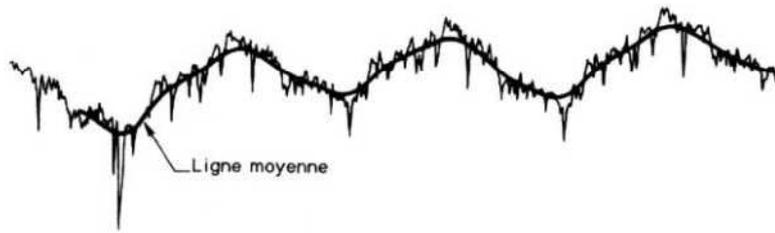
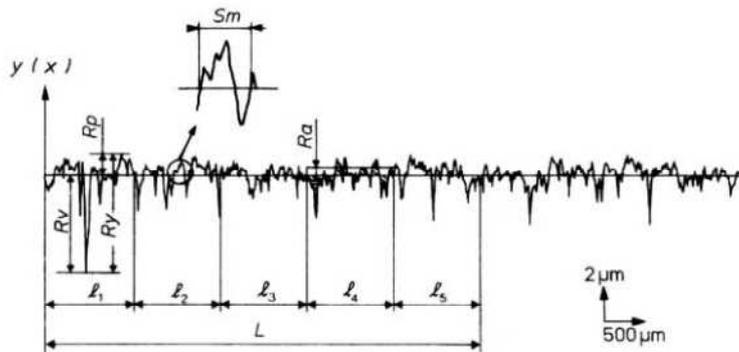


Illustration de la différence entre défaut de forme, ondulation et rugosité (Cartier & Kapsa, 2001)

La mesure de la rugosité d'une surface est donnée par le paramètre  $R_a$ , qui est la moyenne de la variation du profil avec une ligne moyenne redressée de la surface sur une longueur moyenne.



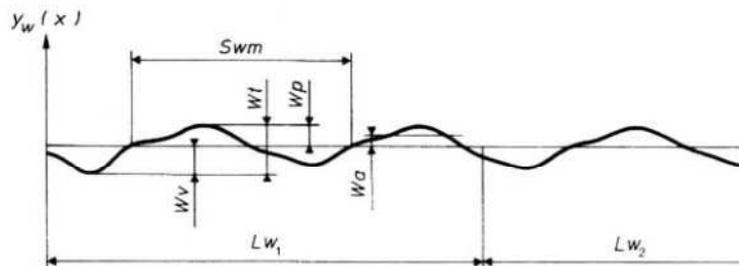
ⓐ ligne moyenne calculée avec un filtre correcteur de phase



$l_1$  à  $l_5$  longueurs de base (pour mesure de la rugosité)  
 $L$  longueur d'évaluation

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

ⓑ profil de rugosité (ligne moyenne redressée)



$Lw_1$ ,  $Lw_2$  longueurs de base (pour mesure de l'ondulation)

$$Wa = \frac{1}{Lw} \int_0^{Lw} |y_w(x)| dx$$

ⓒ profil d'ondulation

Illustration des différents paramètres qualifiant un état de surface [Source : Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface, Technique de l'Ingénieur, B 7 010]

## Les principes généraux de l'usinage par enlèvement de copeaux

Parmi les technologies existantes permettant de mettre en forme une pièce, l'usinage désigne les procédés qui agissent par enlèvement de matière. Le brut de départ est donc plus volumineux que la pièce finale. La matière est enlevée généralement par l'action d'un outil coupant qui arrache des copeaux de matière. L'étude de la génération de ces copeaux en fonction de la taille de l'outil est détaillée dans le cours de Technologies (chapitre 5). Nous nous contenterons ici de rappeler quelques notions qui seront utiles pour les laboratoires d'assemblage, fraisage et tournage.

### **Vitesse de coupe – vitesse d’avance**

Lors de l’usinage d’une pièce, il convient généralement de régler 2 vitesses : la vitesse de coupe, qui définit la vitesse du tranchant de l’outil par rapport à la pièce, et la vitesse d’avance, qui définit la vitesse de déplacement de l’outil pour réaliser l’opération d’usinage.

Par exemple en perçage, il y a lieu de choisir à la fois la vitesse de rotation du foret, et la vitesse d’avance du foret dans la matière. De même en fraisage, il faut choisir la vitesse de rotation de la fraise, et la vitesse de déplacement de la pièce par rapport à la fraise afin de permettre à celle-ci d’enlever de la matière.

Ces vitesses seront choisies essentiellement en fonction de 3 paramètres : le matériau à usiner, le type d’outil utilisé, et la présence ou non de fluide de lubrification et de refroidissement pendant l’usinage.

Naturellement, si l’usinage se fait à l’aide d’un outil en rotation, la vitesse de rotation de la broche devra être inversement proportionnelle au rayon de l’outil. De même si la pièce est en rotation, la vitesse de rotation de la broche sera d’autant plus petite que le rayon de la pièce à usiner est grand.

### **Liquide de coupe**

Dans certains cas, il peut être nécessaire d’arroser l’outil en cours d’usinage. Le liquide de coupe a essentiellement deux fonctions : le refroidissement et la lubrification.

Le refroidissement en cours d’usinage peut être utile, car l’arrachement de matière provoque un échauffement important qui peut être dommageable à la fois pour la pièce en cours d’usinage, qui peut voir ses propriétés mécaniques altérées localement, mais également pour l’outil.

La lubrification facilite également l’évacuation des copeaux et évite la formation d’une arête rapportée sur l’outil (agglomération de particules provenant de la pièce usinée sur l’arête de l’outil, ce qui dégrade l’état de surface de la pièce).

### **Précision de l’usinage**

La précision de l’exécution de l’usinage d’une pièce est bien entendu fonction de l’outil, de la machine et des paramètres d’usinage. Nous souhaitons ici attirer l’attention sur quelques erreurs de manipulation qui peuvent dégrader la précision de l’usinage et qui peuvent être évitées en faisant preuve de rigueur.

### **Propreté de la machine**

L’usinage précis d’une pièce ne peut se faire que sur une machine propre. En effet, la présence d’un copeau sur le bâti de la machine lors de la fixation de la pièce à usiner peut fausser le parallélisme de la pièce par rapport aux axes de la machine.

L’usage veut que la pièce, propre, soit positionnée sur son support, propre lui aussi. Afin de s’assurer que les faces de la pièce et du bâti soient bien en contact, on frappe légèrement la pièce à l’aide d’un maillet avant de la serrer complètement en position.

### **Voilage**

La partie mise en rotation, que ce soit l’outil ou la pièce suivant le procédé d’usinage utilisé, doit être rigoureusement coaxiale avec l’axe de rotation. Une erreur de coaxialité sera responsable notamment de vibrations et d’erreurs géométriques liées au mouvement d’oscillation de la partie en

rotation. Le voilage peut être contrôlé à l'aide d'un comparateur monté perpendiculairement à l'axe de rotation. La touche du comparateur est amenée en contact avec la partie en rotation et une rotation est effectuée à la main. L'amplitude du déplacement de l'aiguille du comparateur donne une mesure du voilage. Cette amplitude doit donc être aussi petite que possible.

## Laboratoire Fraisage

### Objectif du laboratoire

Au cours de cette séance, vous serez familiarisé avec la technique d'usinage par fraisage. L'objectif sera de mettre à dimension les pièces appelées *côtés*. Pour cela, il d'abord comprendre le fonctionnement de la fraiseuse, et ensuite réfléchir aux trajectoires que vous imposerez à l'outil. Il faudra également veiller à régler correctement les paramètres de la machine : la vitesse de rotation de la broche et la vitesse d'avance de l'outil.

### A retenir :

- Fonctionnement général d'une fraiseuse
- Choix des faces de référence, et trajectoire d'outil (fonction du diamètre de l'outil)
- Les différents profils d'outils
- Positionnement de la pièce dans la machine

### Introduction théorique au fraisage

Il est conseillé au lecteur de consulter le chapitre 5.4.2.3.2 du cours de Technologies.

### Principe du fraisage

Le fraisage est une technique d'usinage par enlèvement de copeaux, qui utilise un outil appelé fraise (à ne pas confondre avec un foret). Le fraisage est un procédé relativement flexible, qui permet d'obtenir des géométries variées, suivant le type d'outil et de machine utilisés. Le principe de la génération de copeau est expliqué en détail au chapitre 5.2 du cours de Technologies.

### La fraise

Une fraise est définie avant tout par son profil. Ce profil va définir l'empreinte que l'outil aura sur la pièce à usiner, et dépendra donc de la géométrie qui doit être usinée. Il est également important de savoir quels sont les côtés coupants de la fraise, car suivant le type de fraise, il est possible que certaines directions d'avance soient interdites. Voir ci-dessous quelques profils de fraise.



*Exemples de profils de fraises*

Pour un même profil, il peut exister plusieurs types de fraises suivant le matériau utilisé. Certaines fraises sont par exemple équipées de plaquettes de carbure de tungstène, qui joue le rôle de taillant,

## La fraiseuse

Les fraiseuses sont constituées :

- D'une broche, qui porte l'outil et est mise en rotation. Certaines fraiseuses sont capables à l'heure actuelle d'atteindre des vitesses de 60 000 tours par minute.
- D'un plateau, sur lequel la pièce à usiner sera fixée.

L'architecture de la machine définira si le mouvement d'avance est donné par le déplacement de la broche, par le déplacement du plateau, ou par une combinaison des deux.

Il existe plusieurs familles de fraiseuse. Distinguons d'abord les fraiseuses à broche horizontale (fraisage cylindrique) et les fraiseuses à broche verticale (fraisage frontal). Dans le premier cas, l'axe de rotation de la fraise est parallèle au plan de la table de travail. Dans le second cas, l'axe de rotation de la fraise est perpendiculaire au plan de la table de travail. Dans certains cas, la machine peut être transformée pour passer d'un mode à l'autre. Un autre paramètre de classement est le nombre « d'axes » de la machine. Il s'agit en réalité du nombre de degrés de liberté de déplacement entre l'outil et la pièce à usiner. Les fraiseuses simples ont en général 3 axes, ce qui permet un déplacement suivant 3 directions perpendiculaires entre elles. L'axe z fait référence à l'axe de rotation de la broche (sens positif de la pièce vers l'outil). Des architectures de machines plus sophistiquées proposent 5 axes d'usinage, permettant de changer la direction de l'axe de la broche.

### *Principe du rattrapage de jeu*

Les axes des machines sont entraînés par des vis sans vis. Il existe un certain jeu dans ces entraînements, correspondant au jeu entre l'écrou et la vis. Ainsi, il convient de réfléchir à chaque déplacement pour s'assurer que l'écrou reste en contact avec la même partie du filet de la vis. Par exemple, si l'opérateur change le sens du déplacement suivant une direction, il y aura un certain décalage entre la rotation du volant et le déplacement effectif de la table. Il convient d'en tenir compte lors de la lecture de la position.

### *Présentation de la machine utilisée*

Pour cette séance, vous aurez deux machines à votre disposition. L'une servira à usiner le côté en polycarbonate et l'autre le côté en aluminium.

Les deux machines, à 3 axes, sont montées avec leur broche verticale. Les mouvements d'avance sont faits en déplaçant le plateau.

### *Bridage de la pièce*

Lors de l'usinage d'une pièce, celle-ci subit des contraintes mécaniques très importantes, et il est important de tenir efficacement la pièce sur le plateau de la machine. Ce moyen de fixation, encore appelé bridage, doit être tel que la pièce ne puisse pas bouger ou vibrer pendant l'usinage, ce qui serait préjudiciable à la qualité et à la précision de l'usinage et risquerait d'endommager l'outil. Il faut également que l'orientation de la pièce soit exacte par rapport aux axes de la machine.

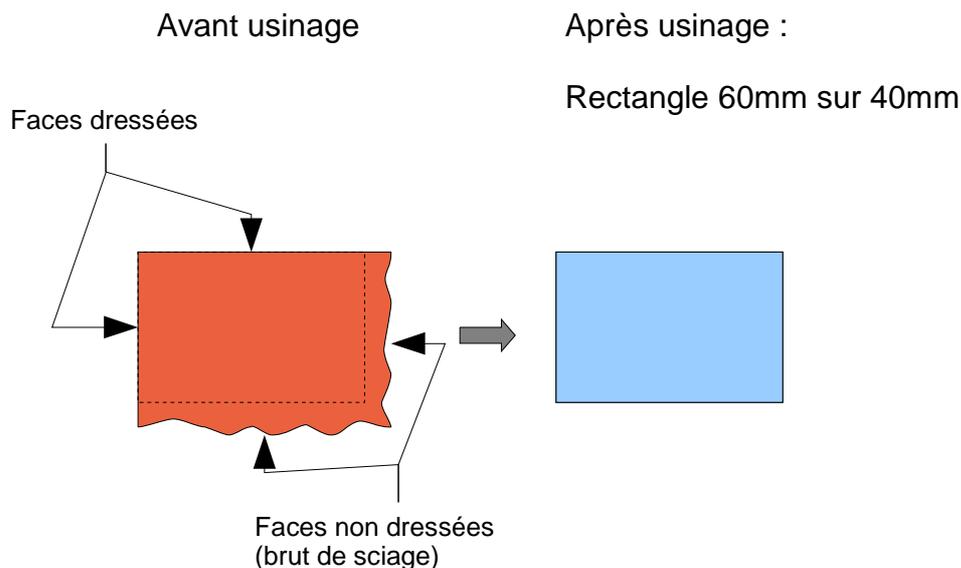
Bien entendu, le système de bridage devra également être choisi de manière à ce que les trajectoires de l'outil n'interfèrent pas avec le système de bridage. Par exemple, serrer une pièce dans un étiau empêche de réaliser le contournement de cette pièce.

### *Stratégie d'usinage et calcul des déplacements*

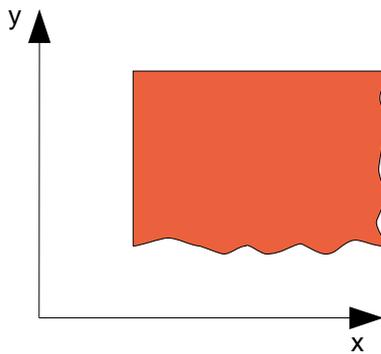
Afin de faire correspondre la géométrie de la pièce à la géométrie recherchée, il convient de définir clairement les trajectoires que l'outil devra emprunter. Pour cela, il faudra notamment tenir compte du diamètre de l'outil utilisé. La position de l'outil devant être défini par rapport à la pièce, il faudra donc prendre une référence de position sur cette pièce.

Cela peut se faire par exemple en remplaçant la fraise dans la broche par un palpeur. On vient alors accoster la pièce avec le palpeur, et dès que le contact est établi, la position du capteur permet de déduire la position du centre de la broche. Une autre solution est d'accoster la pièce directement avec la fraise montée sur la broche. Lorsque la fraise entre en contact avec la matière, le bruit devient caractéristique. Il faut évidemment se déplacer lentement pour que la détection du contact se fasse de manière précise. Une autre solution permettant de positionner la pièce par rapport à machine est d'utiliser des gabarits de positionnement ou des plots de centrage. Ces éléments sont fixés une fois pour toute dans la machine et leur position est connue. La pièce à usiner se place alors sur ces éléments avant serrage. Ce type de positionnement est utile pour le cas où plusieurs pièces identiques doivent être usinées (le temps de montage de la pièce est réduit), ou dans le cas où l'usinage complet de la pièce nécessite des repositionnements (retournement de la pièce par exemple).

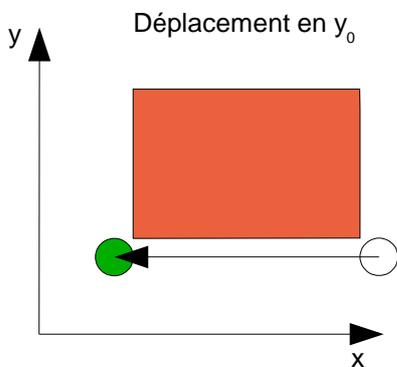
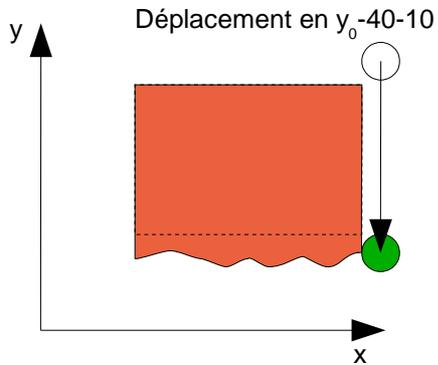
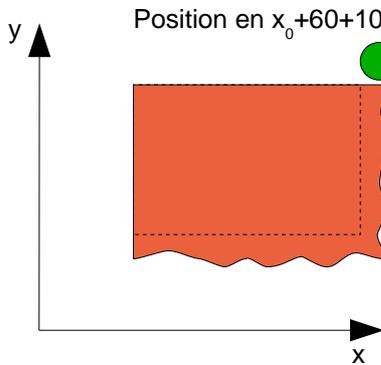
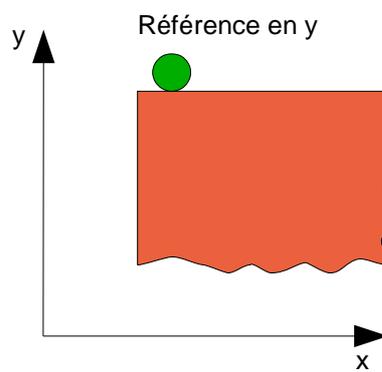
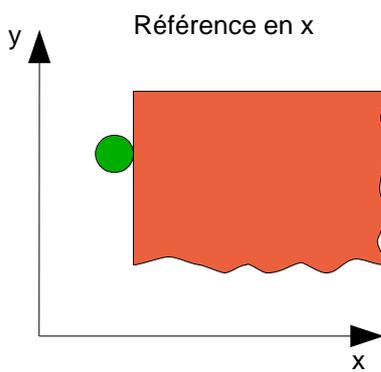
Exemple : contournement d'un rectangle



Fixer la pièce sur le plateau de la machine

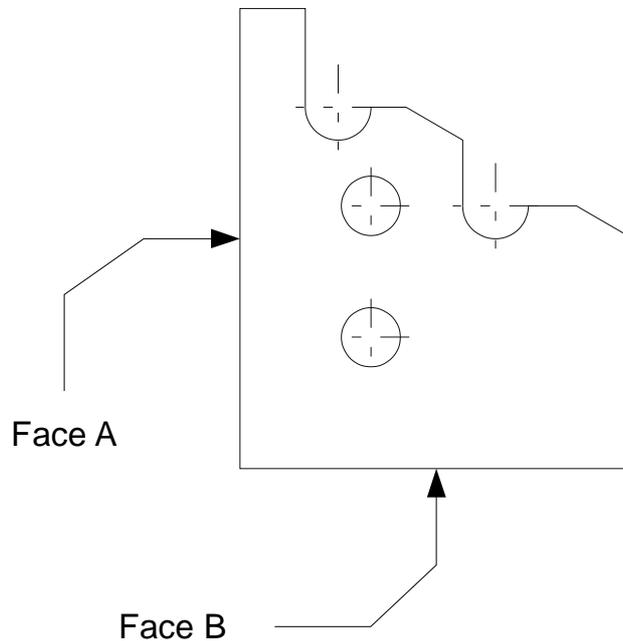


Fraise cylindrique  
Diamètre : 10mm



Le brut qui vous sera donné pour réaliser votre pièce aura déjà été préparé à l'avance, afin de limiter le nombre d'opérations à effectuer. Le brut aura été scié dans une plaque dont l'épaisseur

correspond à l'épaisseur nominale. Deux faces auront été dressées, et correspondront aux faces A et B sur le schéma ci-dessous. Les deux trous auront également été percés. Ces trous permettront la fixation de la pièce sur le gabarit qui sera utilisé pour position et bloquer la pièce sur le plateau de la fraiseuse.



*Vue des faces dressées préalablement*

### Travail à préparer avant la séance

1. Lire l'introduction générale aux travaux pratiques
2. Quel système imagineriez-vous pour tenir la pièce pendant l'usinage ?
3. Quelle est la forme (profil) de l'outil que vous proposez d'utiliser ?
4. Comment allez-vous prendre les références de position pour l'usinage. Faut-il prendre une référence de la position en z ? Pourquoi ?
5. Quelles sont les trajectoires que vous allez imposer à l'outil ?
6. Vous allez devoir usiner une pièce en aluminium et une pièce en polycarbonate. Quels sont les paramètres de réglage de la machine qu'il faudra changer ? Allez-vous utiliser le même outil ? Dans le tableau ci-dessous, on suppose 4 cas de figures : soit on travaille de l'aluminium, soit on travaille du polycarbonate, et soit on travaille avec un outil de petit diamètre, soit un outil de grand diamètre. Pour les vitesses d'avance et de coupe, dites à chaque fois si vous pensez que la vitesse doit être faible ou élevée (il s'agit ici uniquement de donner les tendances).

	Vitesse d'avance	Vitesse de coupe
Alu, petit diamètre		
Alu, grand diamètre		
PC, petit diamètre		
PC, grand diamètre		

### **Déroulement de la séance**

1. Présentation des machines et des outils
2. Démonstration d'une opération de fraisage sur un bloc d'aluminium
3. Réflexion sur les paramètres à prendre en compte
4. Discussion sur la stratégie d'usinage des 2 pièces
5. Prises de mesures
6. Montage des bruts sur les gabarits.
7. Ecriture sur papier des séquences d'usinage
8. Usinage des pièces
9. Vérifications des dimensions réalisées

## Laboratoire de soudage

### Objectif de la séance.

L'objectif de cette séance est de souder les deux pattes sous la plaque de base. Les pièces à assembler sont en acier.

Le travail proposé au cours de cette séance a pour objet de familiariser l'étudiant avec diverses techniques de soudage et de coupage thermique des métaux. Ces techniques ont toutes en commun une utilisation d'énergie sous forme thermique, cette énergie étant produite soit à partir de réactions chimiques exothermiques (flamme oxyacétylénique) soit à partir d'énergie électrique (soudage électrique et techniques plasmas).

L'étude de la flamme oxyacétylénique comportera les divers aspects suivants :

- appareillage utilisé (manodétendeurs, chalumeau-soudeur, chalumeau-coupeur),
- emploi du chalumeau-soudeur (réglage de la flamme, réalisation de soudures et de brasures),
- emploi du chalumeau-coupeur (utilisation pratique sur machine à découper).

Le soudage électrique sera étudié sous les formes suivantes :

- soudage par résistance (emploi d'une soudeuse par points)
- soudage à l'arc (réalisation de soudures par les procédés classiques et par les procédés de soudage sous argon).

Les techniques plasmas seront abordées du point de vue soudage et du point de vue découpage (coupage par jet de plasma).

### A retenir :

- Principes généraux de la soudure
- Avantages et inconvénients des techniques présentées
- Existence des déformations suite à la soudure

### Introduction théorique au soudage

On trouvera ci-dessous à titre d'information et en guise d'introduction au travail proposé, des renseignements théoriques sur :

- principe général de la soudure
- la flamme oxyacétylénique
- l'utilisation de la flamme oxyacétylénique
- le soudage par résistance
- les techniques de soudures utilisant l'arc électrique
- les techniques plasmas

### *Principe général de la soudure :*

La soudure a pour but d'assembler des éléments par continuité de la matière. Dès lors ces pièces doivent être de nature identique.

Cette continuité est obtenue par fusion locale des éléments à assembler et éventuellement d'un matériau d'apport de nature identique aux éléments. Après refroidissement de l'ensemble, du point de vue physique, chimique et mécanique il n'y a plus de différence entre les pièces et la soudure.

## Le soudage

### *Terminologie*

Nous nous conformerons toujours à la terminologie définie ci-dessous :

- soudage : opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs pièces constitutives d'un assemblage en assurant la continuité de la matière
- soudure : joint résultant de l'opération du soudage
- matériaux de base : matériaux constituant les pièces à assembler
- matériaux d'apport : matériaux étranger aux pièces à assembler qui peut intervenir dans la constitution du joint de soudure
- soudure autogène : opération de soudage dans laquelle les pièces à assembler participent à la constitution du joint et pour laquelle matériaux de base et matériaux d'apport sont les mêmes
- brasage : opération dans laquelle, au contraire de la précédente, la constitution du joint est assurée par le métal d'apport, ce dernier étant différent du métal de base ; assemblage hétérogène

### *Les techniques de soudure*

La continuité de la matière, résultant d'une opération de soudage; peut être obtenue soit par fusion et solidification, soit par pression, soit par la combinaison de ces deux effets.

Par la fusion, le joint est porté à l'état liquide par effet thermique et, ensuite; la continuité est obtenue par solidification due au refroidissement sans transformation du matériau.

Par pression, la continuité est obtenue par un effort mécanique appliqué au joint porté à température convenable, cet effort entraînant une déformation plastique, le soudage s'apparente alors au forgeage.

A l'exception de la soudure à froid; dont nous ne parlerons pas ici, le soudage fait donc toujours intervenir une source d'énergie thermique. Cette source doit être puissante, afin de bien localiser ses effets, et de température largement supérieure au point de fusion des pièces à assembler.

### *Les aspects métallurgiques*

Il importe de ne pas altérer les propriétés des matériaux métalliques, en particulier celles du métal de base, au cours d'une opération de soudage. Parmi les causes d'altération éventuelles, nous citerons l'oxydation au contact de l'air, les impuretés introduites par la flamme et la dénaturation du matériau au contact de la flamme par exemple par disparition d'éléments d'addition.

## *La flamme oxyacétylénique - généralités*

### *Le chalumeau*

Le chalumeau est un instrument qui permet d'obtenir une température plus élevée que le point de fusion du Fe par le mélange convenable du point de vue proportions d'un gaz comburant et d'un gaz combustible, mélange qui brûle en donnant une flamme stable, de forme, de puissance thermique et

de propriétés bien déterminées. L'énergie thermique apportée par la combustion ou par des réactions chimiques complémentaires et les qualités de la flamme sont mises à profit dans diverses opérations sur métaux parmi lesquelles nous citerons le soudage, le brasage, l'oxycoupage ou encore la trempe superficielle.

Les techniques de soudage à la flamme oxyacétylénique permettent fort bien d'éviter altérer les propriétés des matériaux métalliques, en particulier celles du métal de base, en effet :

- L'existence d'une zone réductrice dans la flamme oxyacétylénique normale assure, comme nous l'avons déjà indiqué, une protection efficace contre l'action oxydante de l'air, en outre, cette zone permet de décaper les métaux à assembler; c'est-à-dire, d'éliminer les oxydes déposés sur les surfaces comme par exemple la rouille, cette seconde action de la zone réductrice peut être favorisée en ajoutant un produit décapant qui se combine aux oxydes pour donner une scorie facilement éliminable;
- il est aisé de produire des gaz purifiés dont la conservation sera facilitée par leur stockage en bouteilles sous pression;
- en cas de nécessité, le métal d'apport peut très bien contenir les éléments d'addition susceptibles de se volatiliser pendant l'opération de soudage.

On remarquera pour conclure que généralement le métal d'apport se présente sous forme de baguettes métalliques de quelques millimètres de diamètre dans lesquelles sont inclus les éventuels éléments d'addition nécessaires et qui, éventuellement encore, pourront être enrobées dans le produit décapant.

Ordinairement, un chalumeau se compose des divers éléments suivants (voir exemples à l'atelier) :

- un corps, qui comprend les arrivées de gaz et les robinets de réglage
- un dispositif de mélange des gaz comburant et combustible
- une lance conduisant le mélange
- un bec qui constitue un orifice calibré de sortie

## Le choix du mélange comburant - Combustible

### *Qualités thermiques requises*

Divers mélanges gazeux combustibles ont une action thermique suffisante pour pouvoir être utilisés dans un chalumeau. Cette action sera cependant d'autant plus efficace que la température de flamme d'une part et la puissance spécifique de chauffe d'autre part sont élevées. Signalons à titre d'information que, par définition, la puissance spécifique de chauffe est égale à la quantité de chaleur qui traverse l'unité de surface du cône de la flamme par unité de temps, elle est donc proportionnelle à la chaleur de réaction ou pouvoir calorifique du mélange combustible et à la vitesse d'amenée ou vitesse de déflagration de ce mélange.

### *Choix du comburant*

A l'encontre de l'air, c'est l'oxygène qui s'impose comme comburant dans un chalumeau. En effet, l'air, comme on le sait, contient une quantité importante d'azote qui, ne participant pas à la réaction de combustion, prend une partie importante de la chaleur dégagée et abaisse ainsi considérablement la température de la flamme. Pour fixer les idées, signalons que, pour un même

rapport oxygène-combustible, la température d'une flamme air-gaz est inférieure d'environ 1000°C à la température de la flamme oxygène-gaz correspondante.

### *Choix du combustible*

Nous avons rassemblé dans le tableau ci-dessous les principales caractéristiques de la combustion de quelques gaz dans l'oxygène, pour le rapport optimal du mélange.

Voir tableau ci-dessous.

GAZ	ACÉTYLÈNE	GAZ DE VILLE	PROPANE	MÉTHANE
Composition	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> +CH <sub>4</sub> +CO+divers	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CH <sub>4</sub>
Pouvoir calorifique (kcal/(m <sup>3</sup> N))	14000	4300	24300	9410
Vitesse maximale de déflagration (cm/s)	1350	705	370	330
Puissance spécifique de chauffe maximale (kcal/(cm <sup>2</sup> s))	10,9	3,1	2,1	2
Température maximale (°C)	3100	2750	2800	2730

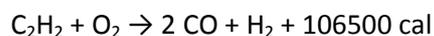
On constate d'après ce tableau que la température maximale, la vitesse de déflagration et donc aussi, et surtout, la puissance spécifique de chauffe sont plus élevées pour l'acétylène. Ceci est la raison principale pour laquelle l'emploi de la flamme oxyacétylénique s'est imposé dans les chalumeaux. Nous verrons par la suite que ce choix offre encore d'autres avantages.

### *Les propriétés de la flamme oxyacétylénique*

#### *Equations de combustion*

La combustion de l'acétylène a lieu en deux temps, le premier dans l'oxygène fourni par le chalumeau, le second dans l'oxygène de l'air entourant la flamme. Nous distinguons ainsi la combustion primaire et la combustion secondaire, réactions toutes deux fortement exothermiques.

Au cours de la combustion primaire, l'acétylène se combine à l'oxygène du chalumeau pour donner de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène :



Au cours de la combustion secondaire, les produits de la combustion primaire se combinent à l'oxygène de l'air entourant la flamme pour donner de l'anhydride carbonique et de la vapeur d'eau :

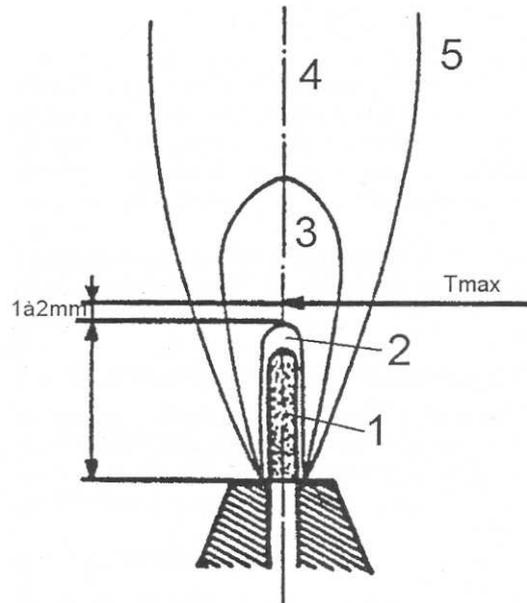


#### *La flamme oxyacétylénique normale*

Nous appelons flamme normale, la flamme obtenue lorsque le dosage du mélange acétylène-oxygène délivré par le chalumeau correspond exactement à l'équation de la combustion primaire, soit un volume d'acétylène pour un volume d'oxygène. Cette flamme se compose de deux parties principales : le dard et le panache.

Le dard est la surface sur laquelle se produit la combustion primaire du mélange gazeux sortant du chalumeau, on y distingue deux zones :

1. une zone intérieure sombre où le mélange oxyacétylénique est chauffé jusqu'à sa température d'inflammation, soit environ 400° C.
2. une zone marginale mince et brillante, lieu de la combustion primaire proprement dite.



Flamme oxyacétylénique normale

1. Mélange oxyacétylénique ( $C_2H_2 + O_2$ )
2. Dard ( $C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2 CO + H_2$ )
3. Zone réductrice ( $2 CO + H_2$ )
4. Panache ( $2 CO + H_2 + 1,5 O_2 \rightarrow 2 CO_2 + H_2O$ )
5. Air ( $O_2 + 4 N_2$ )

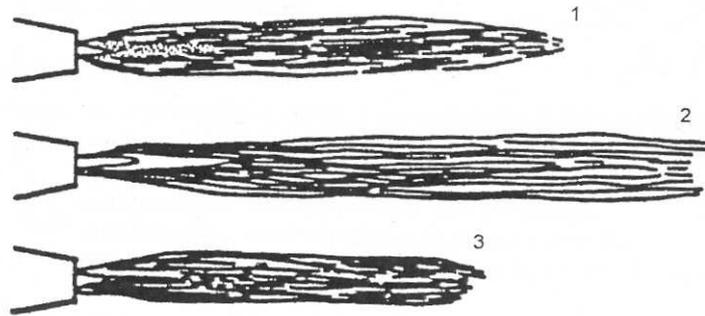
La température de la flamme est maximale à une faible distance en aval du dard, soit environ 1 à 2mm, elle décroît ensuite rapidement lorsqu'on s'éloigne du dard.

Le panache comporte également deux zones distinctes:

1. une zone de teinte sombre entourant le dard et renfermant la plus grande partie des produits de la combustion primaire, ces derniers étant avides d'oxygène, cette zone est réductrice,
2. une zone plus brillante qui constitue le panache proprement dit et qui, entourant la zone réductrice, est le siège de la combustion secondaire.

#### *Les divers types de flamme oxyacétylénique*

Ces types se définissent par rapport à la flamme normale, selon que le rapport du volume d'oxygène ou volume d'acétylène est supérieur ou inférieur à l'unité, nous distinguerons la flamme oxydante et la flamme réductrice ou carburante.



1. *flamme normale*
2. *flamme carburante*
3. *flamme oxydante*

Dans le cas d'une flamme oxydante, la combustion dans le dard est prépondérante et il y a excès d'oxygène dans le panache. Dard et panache sont plus courts que pour une flamme normale. Dans la flamme carburante au contraire, la combustion de l'acétylène se poursuit dans le panache, ce dernier présentant une partie très lumineuse d'autant plus longue que l'excès d'acétylène est grand, cette luminosité étant due à la présence transitoire de carbone libre porté à haute température.

La géométrie et l'aspect très différents de la flamme suivant le dosage du mélange dans le chalumeau sont d'un grand intérêt pratique. Ils permettent en effet un réglage visuel du mélange aisé et surtout très sensible (voir atelier).

#### *Propriétés métallurgiques*

La flamme normale possède d'excellentes qualités métallurgiques du fait de la zone réductrice qu'elle présente. Dans le cas d'une opération de soudage par exemple, cette zone assurera non seulement la protection du métal vis-à-vis de l'action de l'oxygène de l'air, mais elle pourra aussi contribuer à la réduction des oxydes qui auraient pu se former à la surface du métal, c'est-à-dire "décaper" le métal.

#### *Remarque*

Les dénominations "flamme oxydante" ou "flamme réductrice" correspondent essentiellement à la forme de la flamme, elles n'indiquent pas nécessairement le pouvoir oxydant ou réducteur de cette flamme sur un métal déterminé. En effet, la nature du métal est un paramètre important qui ne peut être négligé. On peut pour illustrer ce fait, citer les exemples caractéristiques suivants : l'aluminium est oxydé par une flamme normale, tandis qu'une flamme légèrement oxydante réduit encore l'oxyde de plomb.

#### *Les utilisations de la flamme oxyacétylénique*

##### *Généralités*

La flamme oxyacétylénique a été dans l'histoire du soudage et des techniques connexes la première source d'énergie thermique qui devait provoquer un développement considérable de ces moyens de travail des métaux. La flamme oxyacétylénique est un outil ayant de multiples emplois, elle permet

de souder, couper, recharger, tremper, découper ou encore cémenter superficiellement le métal. En fait, c'est un excellent outil pour toute opération demandant un traitement thermique localisé et ce pour un grand nombre de métaux.

Conformément au programme effectué à l'atelier, nous détaillerons quelque peu ci-dessous deux de ces emplois qui sont les plus importants : le soudage et l'oxycoupage.

### *Les aspects pratiques*

Le soudage oxyacétylénique se pratique à l'aide d'un chalumeau simple ou chalumeau-soudeur, soit manuellement, soit sur machine à souder. Manuellement, le soudage s'effectue pratiquement toujours par fusion uniquement, les tôles minces seront simplement juxtaposées bord à bord. À partir de 3 ou 4 mm d'épaisseur, les tôles devront être chanfreinées, la soudure s'effectuant par remplissage des chanfreins à l'aide de métal d'apport en fusion. Sur machine, on pourra éventuellement combiner les effets de fusion et de pression.

Si la résistance mécanique du joint soudé est prépondérante, il y aura lieu d'effectuer une soudure autogène. Dans les autres cas, une brasure peut suffire, celle-ci s'apparentant au collage, utilise des métaux d'apport à point de fusion plus bas que celui du métal de base, elle n'exige donc pas un chauffage aussi important qu'une soudure autogène et entraîne, par conséquent, de plus faibles contraintes thermiques.

Dans tous les cas cependant, la qualité d'une soudure dépend énormément du soin apporté à son exécution.

### *L'oxycoupage*

#### *Définition et principe*

L'oxycoupage, ou coupe des métaux au jet d'oxygène, consiste à pratiquer une saignée continue dans une pièce métallique par combustion du métal. Cette combustion s'obtient en portant le métal à une température suffisante pour que son oxydation par un jet d'oxygène ait lieu franchement.

L'opération d'oxycoupage nécessite un appareillage spécial qui associe l'action du jet d'oxygène de coupe à celle d'une flamme oxyacétylénique de chauffe, cet appareillage porte le nom de chalumeau-coupeur dont l'extrémité ou buse de coupe comporte le plus généralement :

1. un orifice central livrant le passage à grande vitesse à un jet cylindrique et rectiligne d'oxygène de coupe,
2. une série de petits brûleurs disposés autour de l'orifice central qui produisent ainsi une flamme de chauffe entourant le jet de coupe central.

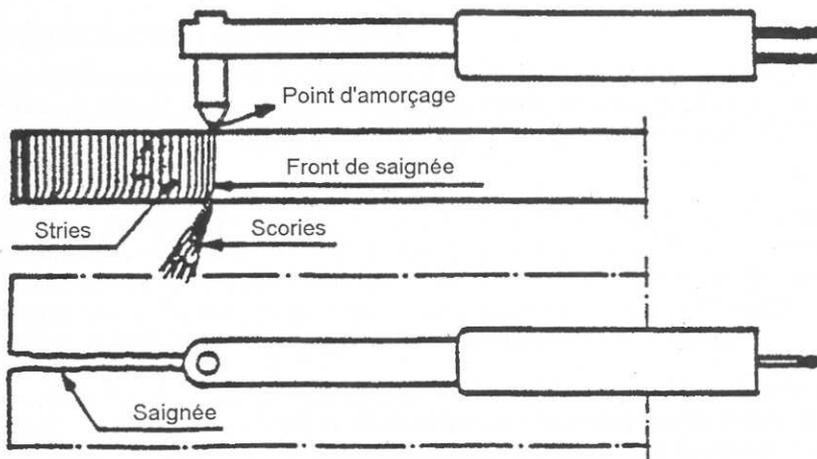


Figure 1.3

Pour amorcer l'opération, on porte un point de la pièce à découper, appelé point d'amorçage, à une température suffisante pour déclencher la réaction d'oxydation et ce, à l'aide de la seule flamme de chauffe. On envoie ensuite le jet de coupe sur ce point, la réaction de combustion s'amorce et se propage à l'intérieur de la pièce en suivant le déplacement du chalumeau (figure 1.3).

Les oxydes, produits de la combustion du métal, s'écoulent à l'état liquide, ils entraînent également une certaine quantité de métal fondu. Le mélange ainsi obtenu constitue la scorie d'oxycoupage qui est projetée hors de la saignée sous l'action énergétique du jet d'oxygène de coupe.

Le profil du front de saignée qui est défini à chaque instant par la trajectoire du jet de coupe dans le métal (figure 1.3), dépend essentiellement des conditions opératoires. On retrouve sur les lèvres de la saignée des fines lignes qui matérialisent ce profil et que l'on appelle stries d'oxycoupage. Les stries montrent que généralement le jet de coupe est dévié à l'intérieur de la saignée (figure 1.3).

#### *Conditions nécessaires pour l'oxycoupage*

Pour qu'une opération d'oxycoupage soit réalisable, trois conditions doivent nécessairement être réalisées:

1. La réaction d'oxydation ou de combustion du métal doit être suffisamment exothermique pour que localement, à l'intérieur de la saignée, le métal soit porté à la température d'amorçage, c'est en effet, la combustion elle-même qui fournit l'énergie thermique nécessaire à la poursuite de l'oxycoupage, la flamme de chauffe, tout aussi indispensable, se bornant à porter l'arête supérieure de la saignée à cette même température d'amorçage.
2. La température d'amorçage doit être inférieure à la température de fusion du métal, en effet, s'il n'en était pas ainsi, on opérerait par fusion localisée et non par oxycoupage.
3. La température de fusion de l'oxyde formé doit également être inférieure à la température de fusion du métal, ceci afin de permettre l'élimination de la scorie d'oxycoupage en cours de travail.

Ces conditions sont extrêmement contraignantes. Ainsi, l'aluminium, par exemple, malgré sa grande affinité pour l'oxygène, ne pourra pas être oxycoupé, en effet, l'oxyde formé, l'alumine, est solide; il ne peut donc s'éliminer et empêche la propagation de la combustion. En pratique, seuls le fer et sous certaines conditions les aciers peuvent être oxycoupés par les méthodes classiques. Pour ces

matériaux en effet la température d'amorçage, qui est de l'ordre de 1300 à 1350 °C, et la température de fusion de l'oxyde sont inférieures à la température de fusion du métal lui-même.

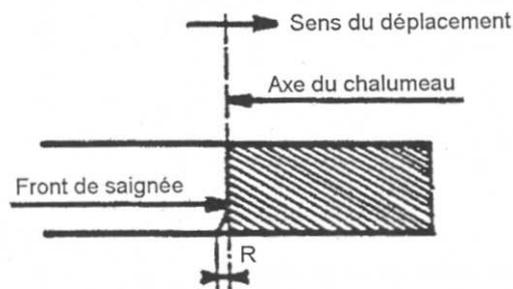
Les autres matériaux peuvent être coupés thermiquement mais uniquement par fusion localisée (voir « les techniques plasmas »).

#### *La pratique de l'oxycoupage*

Dans la pratique de l'oxycoupage, c'est la flamme oxyacétylénique qui s'est imposée comme flamme de chauffe, en effet, cette flamme cumule les avantages d'un amorçage rapide, ce qui est particulièrement avantageux pour les coupes de faible longueur, et d'une précision élevée du réglage, ce qui permet d'obtenir une excellente constance des conditions de coupe.

La qualité de la coupe dépend essentiellement des conditions dans lesquelles on assure le mouvement d'avance du chalumeau-coupeur. Celui-ci peut être réalisé manuellement ou automatiquement. Dans le premier cas, la coupe sera tributaire de l'habileté du manipulateur et notamment de sa régularité. Dans le second cas, l'opération est réalisée sur machines découpeuses qui permettent de régler la vitesse d'avance à la valeur choisie et ce pour le découpage de pièces de forme quelconque grâce à la technique du gabarit (voir atelier).

Pour une composition donnée d'acier à découper, les conditions d'exécution d'une coupe sont principalement fonctions de l'épaisseur de la pièce à découper. Celle-ci fixe en effet le diamètre de la buse de coupe à utiliser, la pression du jet de coupe, la vitesse du mouvement d'avance et le réglage de la flamme de chauffe. Insistons sur le réglage de la vitesse d'avance qui est essentiel, ce réglage doit être tel que l'on obtienne à la fois un écoulement continu et régulier de l'oxyde à la base de la saignée et le maintien de la température d'amorçage à la partie supérieure de cette saignée.



En cours d'opération, le front de saignée est généralement incurvé, la partie inférieure est décalée par rapport à la lèvre supérieure, ce décalage appelé retard (R sur la figure ci-dessus), est sans influence sensible sur la qualité de la coupe, à condition de ne pas être trop prononcé. On remarquera que ce retard est d'autant plus élevé que la vitesse d'avance est élevée, aussi y a-t-il avantage à admettre un retard aussi grand que possible ceci afin de pouvoir effectuer un travail rapide.

Le réglage du chalumeau-coupeur sera étudié en détail à l'atelier en se basant sur l'aspect visuel des résultats obtenus et en corrigeant les défauts constatés qui seraient dus à des mauvaises conditions de coupe.

## Les techniques électriques

### Le soudage par résistance

#### Le principe de l'opération

Lors d'une opération de soudage par résistance, on fait passer un courant électrique d'intensité élevée entre les surfaces des éléments à assembler et, simultanément, on applique très fortement ces surfaces l'une contre l'autre. Le passage du courant électrique provoque, par effet Joule ( $P = R I^2$ ), le chauffage des éléments à souder tandis que la pression maintenant les surfaces en contact provoque le forgeage de la soudure. Dès lors, les points d'assemblages seront portés à une température inférieure au point de fusion du matériau.

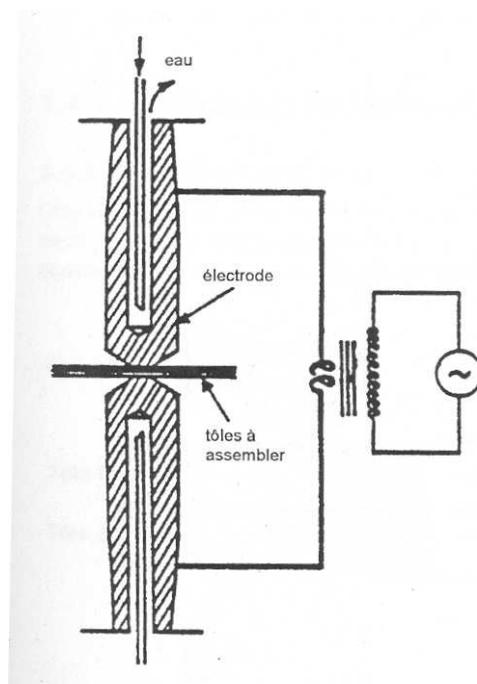
#### Les modes de soudage par résistance

##### Le soudage par recouvrement

Comme son nom l'indique, le soudage par recouvrement consiste à souder entre eux des éléments, comme par exemple des tôles, superposés. La soudure ainsi obtenue peut être localisée en un certain nombre de points ou au contraire être continue.

Dans l'opération de soudage par points, les tôles à assembler sont comprimées localement entre les électrodes qui laissent passer pendant un temps très court un courant intense (figure ci-dessous). Aux endroits ainsi traités, on obtient des soudures jouant le rôle de rivets.

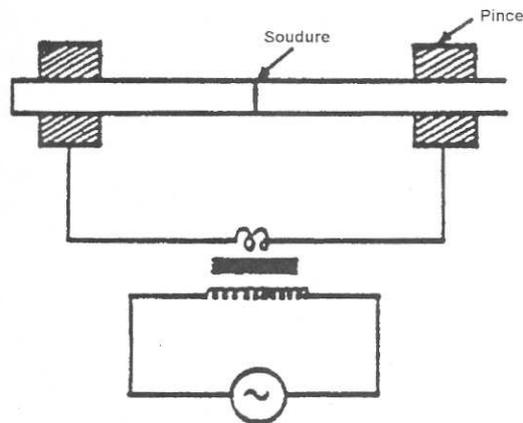
Dans l'opération de soudage continu, les électrodes utilisées sont des molettes entre lesquelles passent les tôles à assembler.



##### Le soudage en bout

Le procédé de soudage en bout est utilisé pour joindre bout à bout des tubes, des barres, des profilés ou encore des tôles. Les pièces à assembler sont placées dans des pinces qui assurent à la fois le

passage du courant électrique de soudage et la pression de contact entre les pièces (figure 1.6). On distingue le soudage simple à contact initial et le soudage par étincelle, sans contact initial.



Le soudage simple à contact initial s'opère comme suit :

1. les pièces à souder sont mises en contact sous pression
2. le courant soudant est enclenché, par effet Joule, le joint se ramollit, les pièces sont refoulées l'une contre l'autre sous l'effet de la pression initiale de contact et se renflent en bourrelet
3. le courant soudant est coupé tandis que la pression de contact est maintenue jusqu'au refroidissement de la soudure

Le soudage par étincelle sans contact initial, quant à lui s'opère comme suit :

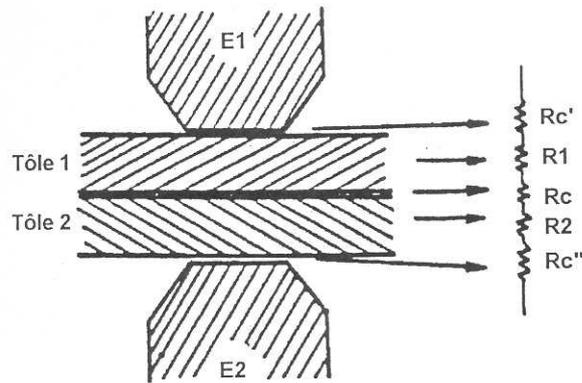
1. les pièces à souder sont mises sous tension et elles sont ensuite rapprochées jusqu'à ce qu'un arc jaillisse entre elles
2. l'arc produit est maintenu pendant le temps nécessaire à porter les pièces à la température de soudage, pendant cette période, appelée période d'étincelage, les pièces sont lentement rapprochées sans qu'il y ait jamais contact franc
3. les pièces sont mises en contact franc sous pression, une fois la soudure forgée, le courant est coupé et la pression de contact est maintenue jusqu'au refroidissement

### *Quelques remarques sur la soudure par points*

#### *Résistance électrique du circuit de soudage*

Considérons deux tôles à assembler par points. De part et d'autre de ces tôles sont appliquées deux électrodes E1 et E2 raccordées à une source d'énergie électrique (figure ci-dessous). Si on détaille les résistances électriques rencontrées entre les électrodes E1 et E2, on trouve successivement :

- $R_c'$ : résistance de contact E1 - tôle 1
- $R_1$  : résistance de la tôle 1
- $R_c$ : résistance de contact tôle 1 - tôle 2
- $R_2$ : résistance de la tôle 2
- $R_c''$  : résistance de contact tôle 2 - E2



La résistance globale entre électrodes est faible. Aussi en sera-t-il de même de la tension d'alimentation des électrodes qui vaut quelques Volt seulement.

#### *Source d'énergie électrique*

La résistance électrique étant faible, une soudure rapide exigera l'emploi d'un courant de soudage intense, cette condition, alliée à celle d'une faible tension d'alimentation, est obtenue en utilisant un transformateur dont le primaire est raccordé au réseau et dont le secondaire, à petit nombre de spires, est court-circuité sur les pièces à souder par l'intermédiaire des deux électrodes.

#### *Action thermique du courant de soudage*

Dans la chaîne des résistances considérées ci-dessus, les résistances de contact sont toujours plus élevées que les résistances de tôle. L'échauffement par effet de Joule est donc plus élevé aux divers points de contact. Cette concentration de chaleur est favorable à la soudure des deux tôles mais elle est inutile et même néfaste au niveau des contacts électrodes-tôles. Les électrodes ont en effet tendance à s'échauffer exagérément et risquent de se déformer localement pendant la période de forgeage. On évitera en grande partie ces inconvénients en réalisant les électrodes en métal bon conducteur de la chaleur, par exemple le cuivre rouge, et en réalisant un refroidissement énergique de ces électrodes par une circulation d'eau.

#### *Action mécanique des électrodes*

La pression de forgeage est exercée par les électrodes, à l'entremise d'un système mécanique approprié (voir atelier). Cette pression agit pendant la phase d'échauffement pour contrecarrer la dilatation des tôles à assembler et pendant la phase de soudage afin d'assurer le forgeage de la soudure. Elle est maintenue jusqu'à refroidissement complet du point soudé.

### **Le soudage à l'arc électrique**

#### *Introduction*

Après avoir développé quelques généralités sur le soudage à l'arc électrique, nous détaillerons plus particulièrement trois procédés mettant en œuvre cette technique, soient :

- le soudage dans l'air à **électrode fusible**, procédé le plus répandu notamment pour le soudage des aciers ordinaires
- le soudage sous atmosphère d'argon TIG (Tungstène Inert Gaz ) procédé plus précis qui s'est développé notamment pour le soudage des alliages légers

- le soudage sous atmosphère d'argon MIG (Metal Inert Gaz ) procédé plus rapide qui s'est développé notamment pour le soudage rapide ou à dépôt de matière important.

### *Généralités*

#### *Classification des procédés de soudage à l'arc*

Dans les procédés de soudage à l'arc, l'énergie nécessaire à l'opération, c'est-à-dire, à la fusion des bords de pièces à assembler et éventuellement à celle d'un métal d'apport, est empruntée à l'énergie dissipée dans un arc électrique. Sous la même dénomination de soudage à l'arc, on comprend plusieurs procédés nettement différents que l'on peut classer de la manière suivante :

- Soudage à électrode fusible, dans lequel on fait jaillir l'arc entre les pièces à souder et une électrode métallique fusible qui fournit le métal d'apport et dans lequel on distingue les cas suivants :
  - a. soudage dans l'air,
  - b. soudage sous gaz inerte (hélium, argon),
  - c. soudage sous gaz dit actif (argon + par exemple Co<sub>2</sub>),
  - d. soudage sous flux électroconducteur, pour lequel l'arc s'établit au sein d'un mélange de matières solides recouvrant les pièces à souder.
  - e. Soudage à une électrode réfractaire, dans lequel l'arc est établi entre les pièces à souder et une électrode non fusible sous atmosphère inerte (TIG). Ce procédé s'apparente au soudage à la flamme puisque les apports de chaleur et de métal d'appoint sont indépendants.

#### *L'arc électrique*

Lorsqu'on coupe un circuit électrique, un arc peut s'établir et se stabiliser entre les deux extrémités de la coupure si la différence de tension entre ces deux extrémités est suffisante. Lorsqu'il jaillit, l'arc se présente comme un noyau entouré d'une auréole. Dans la partie centrale du noyau, les températures sont très élevées (elles peuvent dépasser 7000°C). Le noyau apparaît au total comme un flux d'électrons et d'ions se propageant au sein d'un milieu à haute température. Lorsqu'une électrode est fusible, on a en plus un transfert de métal.

En première approximation, le régime de fonctionnement d'un arc électrique dépend de trois variables : la tension aux bornes, le courant et la longueur.

Ces trois variables ne sont pas indépendantes. Sommairement exprimées, les propriétés fondamentales des arcs sont les suivantes :

- la tension aux bornes d'un arc dépend de la nature des électrodes et de la composition de l'atmosphère dans laquelle l'arc jaillit;
- à courant constant, la tension aux bornes croît avec la longueur de l'arc;
- à longueur constante, l'allure de la variation de tension en fonction du courant est hyperbolique, la tension décroît puis reste sensiblement constante (on remarquera qu'au sens de la loi d'Ohm, la résistance de l'arc est d'abord négative puis tend à s'annuler).

En général, comme on désire un effet thermique élevé, les arcs de soudage seront courts (+/- 2 à 3mm de longueur d'arc) et parcourus par des courants intenses.

### *Courant de soudage*

Le courant de soudage peut être soit continu, soit alternatif, dans la plupart des cas de soudage des aciers au carbone faiblement alliés, on utilisera indifféremment l'un ou l'autre, dans d'autres cas, plus particuliers, le courant continu ou le courant alternatif s'imposera exclusivement.

#### Soudage en courant continu

L'arc en courant continu est caractérisé d'une part par une remarquable stabilité qui facilite grandement l'opération de soudage, d'autre part par le fait que les pôles entre lesquels il jaillit ne sont pas équivalents. En effet, comme le montrent les quelques considérations suivantes, les comportements de la cathode (pôle négatif) et de l'anode (pôle positif) sont différents:

- l'arc, trouvant son origine dans l'émission électronique de la cathode, est lié à la tache cathodique, dans le soudage à une électrode, fusible ou non, l'arc suivra mieux les déplacements de cette électrode lorsque celle-ci est la cathode (soudage à polarité normale) que lorsqu'elle est l'anode (soudage à polarité inverse).
- le point d'impact de l'arc sur l'anode, **pôle +**, (tache anodique) est plus chaud que la tache cathodique **pôle -**, la différence des températures de ces taches peut atteindre 1000°C.
- sous l'effet du flux d'électrons, le décapage de la cathode est meilleur que celui de l'anode.

Dans certains cas, cette différence entre les comportements cathodique et anodique imposera le choix de la polarité, certaines soudures ne pourront être effectuées qu'en polarité normale, tandis que d'autres ne sont réalisables qu'en polarité inverse.

#### Soudage en courant alternatif

L'arc en courant alternatif est moins stable qu'en courant continu, en effet, chaque fois que la tension passe par zéro, l'arc s'éteint et risque de ne pas se réamorcer. Certaines précautions peuvent être prises qui toutes tendent à maintenir une bonne ionisation de l'atmosphère gazeuse dans laquelle se produit l'arc afin de faciliter le réamorçage (ex : déphasage du courant sur la tension).

D'une façon générale, la stabilité de l'arc sera d'autant meilleure que la fréquence du courant est élevée (l'atmosphère gazeuse « n'a pas le temps » de se désioniser), pour les cas ordinaires de soudage, la fréquence industrielle de 50 Hz est suffisante. Dans les cas difficiles par contre, on superpose au courant de soudage un courant de faible intensité à haute fréquence qui maintient une ionisation élevée de l'atmosphère de l'arc. Dans tous les cas, la tension nécessaire au fonctionnement de l'arc est plus grande en courant alternatif qu'en courant continu.

Le soudage en courant alternatif est caractérisé par un comportement identique des deux pôles de l'arc, il sera toujours utilisé lorsque cette identité est souhaitable comme par exemple dans le cas du soudage à deux électrodes réfractaires.

### *Le soudage dans l'air à électrode fusible*

#### *L'électrode enrobée*

Tous les procédés modernes de soudage à électrode fusible utilisent des électrodes enrobées, celles-ci sont des baguettes cylindriques composées d'une partie centrale métallique, l'âme, entourée d'une gaine plus ou moins épaisse composée de matières généralement non métalliques, l'enrobage. L'âme métallique conduit le courant de soudage et constitue la source du métal d'apport, sa composition dépend de la nature des pièces à souder. L'enrobage a une composition complexe qui

lui permet d'assurer de nombreuses fonctions que toutes tendent à l'obtention d'une soudure de bonne qualité et parmi lesquelles on citera principalement :

- **action thermique pendant l'arc et avant fusion** : l'enrobage, isolant thermique, concentre la chaleur dans la partie qui émet l'arc
- **une action électrique** : l'enrobage contient des émetteurs d'électrons qui améliorent l'ionisation du milieu gazeux permettant ainsi une meilleure stabilité de l'arc.
- **une action mécanique** : l'enrobage dirige l'arc dans le prolongement de l'électrode et facilite ainsi la conduite du bain de fusion (ce sera le cas des enrobages à point de fusion plus élevé que celui de l'âme).
- **actions chimiques** : L'enrobage, en brûlant, **consomme l'oxygène ambiant** protégeant le métal de l'électrode, pendant son transfert et le bain de fusion de l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air,.

D'autre part, l'enrobage contient des éléments destinés à former un laitier protecteur. Enfin l'enrobage permet d'incorporer des éléments et additifs améliorants dans le métal en fusion et permet le dégazage du bain de fusion.

#### *Le rôle du laitier :*

L'enrobage brûlé (Laitier) qui c'est déposé sur le cordon de soudure est très important : plus léger que le métal, il forme une scorie qui couvre la soudure. Cette scorie améliore la qualité de la soudure :

- protection contre l'action oxydante de l'air ambiant
- ralentissement du refroidissement permettant notamment l'élimination des gaz dissous et permet de limiter les tensions dans la matière qu'aurait provoqué un refroidissement brutal
- élimination des impuretés et des éléments nuisibles par affinage chimique)

#### *Propriétés générales et classification des enrobages*

Les enrobages peuvent être classés selon de nombreuses propriétés, nous citerons :

- la composition chimique globale (enrobages minéraux, semi-organiques),
- l'affinité chimique (enrobages acides, basiques, neutres ou saturés),
- le pouvoir oxydant (enrobages oxydants, réducteurs; neutres),
- le comportement en cours de soudage (enrobages fusibles, réfractaires, semi-volatils, à apport de métal).

Plus d'une centaine de produits sont actuellement utilisés dans la préparation des enrobages. On constate cependant que la plupart des électrodes enrobées du commerce peuvent être rangées dans un nombre de classes relativement restreint.

Le classement des électrodes enrobées fait l'objet de diverses normes (norme ISO, projet de norme de l'Institut Belge de la Soudure, etc.) dans lesquelles chaque classe d'électrode a été désignée par une lettre majuscule (classes O, A, R, T, C, B, V). On pourra consulter à l'atelier des tableaux résumant, pour chaque classe normalisée, les propriétés principales et les caractéristiques d'utilisation des électrodes correspondantes.

### *Choix des paramètres de soudage*

La réussite d'une opération de soudage exige non seulement l'habileté manuelle du soudeur, mais également un choix relativement précis des paramètres technologiques de travail, c'est-à-dire du type d'électrode, du diamètre de l'électrode, de l'intensité du courant de soudage et de la vitesse d'avancement du cordon de soudure.

#### *Le type d'électrode*

Le type ou la classe d'électrode à utiliser dépend essentiellement de la nature de l'opération à réaliser, c'est-à-dire du type de construction (courante, de réparation ou encore de haute sécurité), de la nature du métal mis en œuvre, de la facilité opératoire, etc. En règle générale, elle sera de même nature que les pièces à assembler.

#### *Le diamètre de l'électrode*

Du point de vue économie de temps, il y a intérêt à travailler avec des électrodes aussi grosses que possible. En effet, de telles électrodes acceptent des intensités de courant de soudage élevées et permettent ainsi de déposer rapidement le métal d'apport. Les dimensions des électrodes sont cependant limitées par l'épaisseur des pièces à assembler, la forme du dépôt à obtenir, la position du cordon de soudure dans l'espace.

#### *L'intensité du courant de soudage*

Lorsque, pour une électrode donnée l'intensité du courant de soudage croît, la vitesse de fusion de l'âme de cette électrode augmente. A vitesse d'avancement du cordon constante, une plus grande quantité de métal est déposée par unité de longueur de cordon et une plus grande quantité de chaleur est fournie aux pièces à souder. Le métal déposé, plus fluide, s'étale davantage et la pénétration de la soudure (profondeur du bain de fusion dans le métal de base) est augmentée. Ces considérations imposent pour le choix du courant de soudage une zone assez strictement définie.

En effet :

- pour une intensité trop faible, la pénétration de la soudure ne sera pas suffisante, le résultat de l'opération ne sera pas un soudage mais au contraire un collage du métal d'apport sur le métal de base
- pour une intensité trop élevée, la pénétration de la soudure sera excessive, il en résultera un perçage ou des morsures dans les pièces à assembler selon que celles-ci seront minces ou plus épaisses, en outre, le métal sera partiellement brûlé et l'électrode trop chaude fonctionnera mal (crachements)

#### *La vitesse d'avance du cordon*

L'influence de la vitesse d'avancement du cordon est opposée à celle de l'intensité du courant de soudage, à intensité courante, la pénétration de la soudure sera d'autant meilleure que la vitesse d'avancement est lente.

Afin d'éviter le collage ou une pénétration excessive, il faudra maintenir la vitesse d'avancement entre deux limites qui dépendront du type de travail à effectuer (par exemple de l'épaisseur des pièces à assembler). Signalons enfin que, toutes autres choses égales, on pourra travailler à des vitesses d'autant plus grandes que l'intensité du courant de soudage est élevée.

## *Le soudage sous atmosphère d'argon – Type TIG*

### *Principe*

Le procédé de soudage à l'arc sous atmosphère d'argon diffère du procédé classique par le mode de protection du bain de fusion, ce dernier n'est plus protégé par un laitier provenant d'un enrobage mais par un flux de gaz inerte. La suppression de l'enrobage diminue les risques d'inclusion, au total la qualité de la soudure est meilleure.

Ce procédé a permis de résoudre le problème du soudage des alliages légers (à base de magnésium et d'aluminium), il est également utilisé pour les aciers inoxydables et le cuivre.

### *Mise en œuvre*

À l'origine, le soudage sous atmosphère inerte a été effectué à l'aide d'une électrode réfractaire (tungstène ou tungstène thorié). Le choix du courant de soudage dépend à la fois de la nature du métal à souder et du type d'électrode. Dans tous les cas où le courant alternatif est utilisé, on superpose au courant de soudage un courant à haute fréquence et à haute tension afin d'assurer une bonne stabilisation de l'arc.

### *Soudage de l'aluminium et des alliages légers*

Avec électrode réfractaire, l'opération est toujours effectuée en courant alternatif. En courant continu, en effet, afin d'assurer un bon décapage des pièces à assembler, il faudrait travailler en polarité inverse (électrode positive) et l'électrode serait rapidement usée. Avec électrode fusible par contre, la polarité inverse n'est plus gênante et est d'ailleurs utilisée.

### *Soudage des aciers inoxydables*

Avec électrode réfractaire, l'opération peut être effectuée en courant alternatif ou en courant continu à polarité normale. Avec électrode fusible, on utilise généralement le courant continu à polarité inverse.

## Le soudage sous atmosphère d'argon – Type MIG/MAG

### *Principe*

Comme pour le TIG vu au point précédent, le procédé de soudage à l'arc sous atmosphère d'argon diffère du procédé classique par le mode de protection du bain de fusion, ce dernier n'est plus protégé par un laitier provenant d'un enrobage mais par un flux de gaz inerte (Mig) ou actif (Mag). L'utilisation d'un gaz actif permet un dépôt de matière plus important dans le cas du Fe

L'électrode est le métal d'apport qui sort de la torche, comme celle-ci fond, il faut la renouveler immédiatement. Le métal doit arriver en continu lors du dépôt du cordon de soudure.

Il est également utilisé pour les aciers inoxydables, le cuivre et l'aluminium.

## *Les techniques plasmas*

### *Introduction*

Nous appelons ici plasma un gaz porté à haute température. Un plasma peut être considéré comme un quatrième état de la matière, état dans lequel un gaz est à température suffisamment élevée pour contenir une fraction plus ou moins importante de particules ionisées. Une colonne de gaz plasma peut donc apparaître ainsi comme un conducteur électrique gazeux.

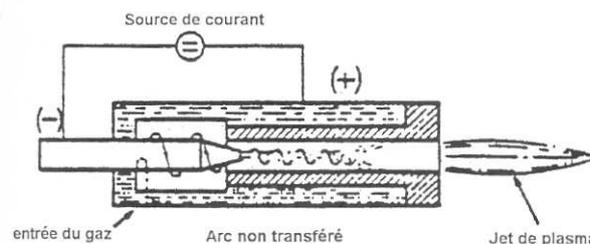
Les techniques plasmas sont nées de travaux de recherche visant à obtenir des températures supérieures aux températures normales d'arc électrique qui ne dépassent guère 6000°C. On peut donc les considérer comme une extension des techniques de soudage à l'arc.

### Principe

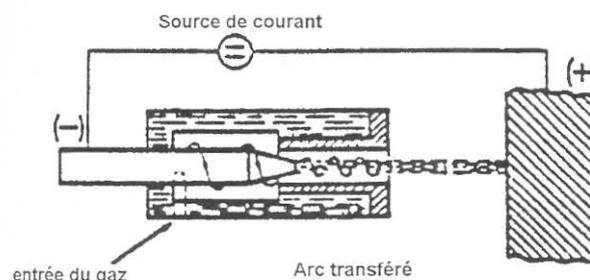
Le principe de l'obtention d'un arc plasma est basé sur la construction d'un arc électrique d'intensité élevée. Cette construction, ou si l'on préfère le confinement de l'arc dans un espace restreint, est obtenu au moyen d'un flux gazeux circulant à grande vitesse. Ce flux gazeux après avoir confiné et « traversé » l'arc électrique peut atteindre des températures très élevées, des températures de 10000°C peuvent être considérées comme normales.

Deux procédés techniques se sont imposés dans la pratique : l'arc non transféré et l'arc transféré.

Dans le premier procédé, on utilise une torche plasma qui comporte deux électrodes entre lesquelles on fait jaillir l'arc électrique. Cet arc est confiné par un gaz circulant à grande vitesse, à la sortie de la torche, le gaz, à très haute température est disponible comme source de chaleur



Dans le second procédé, l'arc jaillit entre l'électrode centrale de la torche plasma et une pièce métallique extérieure. La colonne de plasma apparaît ici sous son aspect « conducteur électrique gazeux ». La torche plasma quant à elle apparaît comme une extension de la torche à souder sous atmosphère inerte. L'arc transféré est à la base de tous les procédés de soudage au plasma. Normalement, l'amorçage de l'arc transféré s'effectue à l'aide d'un arc auxiliaire non transféré (voir atelier).



### Utilisation des techniques plasmas

#### Soudage plasma

Les techniques plasmas sont utilisées en soudage en complément des techniques de soudage à l'arc classique. Sauf exception le soudage plasma s'effectue avec arc transféré. Grâce à cette technique, le champ d'action du soudage électrique à arc a pu être étendu à la fois vers les faibles valeurs de l'intensité du courant soudant, valeurs correspondant à des arcs classiques instables, et vers les

fortes valeurs de l'intensité du courant soudant, valeurs correspondant à des électrodes classiques de trop grandes dimensions ou inutilisables car s'échauffant trop. Pour les petites intensités, on parlera de soudage microplasma.

#### *Découpage plasma*

Les techniques plasmas conviennent bien pour effectuer des coupages thermiques des métaux. Le procédé utilisé est généralement celui de l'arc transféré. Un chalumeau-coupeur plasma apparaît ainsi comme un excellent complément du chalumeau-coupeur oxyacétylénique à la fois par l'extension du nombre de métaux qu'il permet de traiter et par l'efficacité très grande du travail qu'il peut effectuer du fait des grandes puissances thermiques qu'il permet d'atteindre (Non disponible à l'atelier).

#### *Autre utilisations*

Les techniques plasmas sont encore utilisées pour projeter des matériaux à haut point de fusion et réaliser ainsi des revêtements protecteurs divers de très fine épaisseur. La projection est réalisée à l'aide d'un pistolet à jet de plasma alimenté en matériaux à projeter sous forme de poudre en utilisant le procédé de l'arc non transféré. Enfin, en combinant les techniques de l'arc transféré et de l'arc non transféré on peut également effectuer des rechargements de matière à l'arc plasma.

### **Travail à préparer avant la séance**

Les étudiants doivent avoir lu et compris l'introduction théorique.

Les étudiants sont également invités à réfléchir aux problèmes suivants :

- Comment tenir les pattes en position lors du soudage ?
- Quelles sont les conséquences possibles du soudage pour la plaque de base ? Quelle incidence cela peut-il avoir sur les autres laboratoires ?

### **Déroulement de la séance**

Les étudiants commenceront par s'entraîner sur des pièces martyres aux techniques d'arc électrique, MIG et TIG. Finalement, les étudiants devront souder les pattes de support sous la plaque de base.

Suivant le temps disponible, une démonstration de soudure au chalumeau et d'oxycoupage sera également réalisée.

## Laboratoire de tournage

### Objectif du laboratoire

L'objectif du laboratoire est de réaliser au tour la pièce appelé « pot ». Pour cela, vous partirez d'un barreau d'aluminium dont le diamètre nominal extérieur est égal au diamètre nominal extérieur du pot. Vous réaliserez les opérations de dressage des faces, de perçage, d'alésage et de décolletage (pour l'épaulement).

### **A retenir :**

- Principe de fonctionnement du tour
- Principales opérations réalisables
- Importance du positionnement de la pièce dans le mandrin

### Introduction théorique au tournage

Cette introduction est basée sur les notes « *Fabrication de pièces d'usinage simple en tournage* », édité par l'Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail (Royaume du Maroc).

### *Présentation du tour parallèle*

#### Généralités

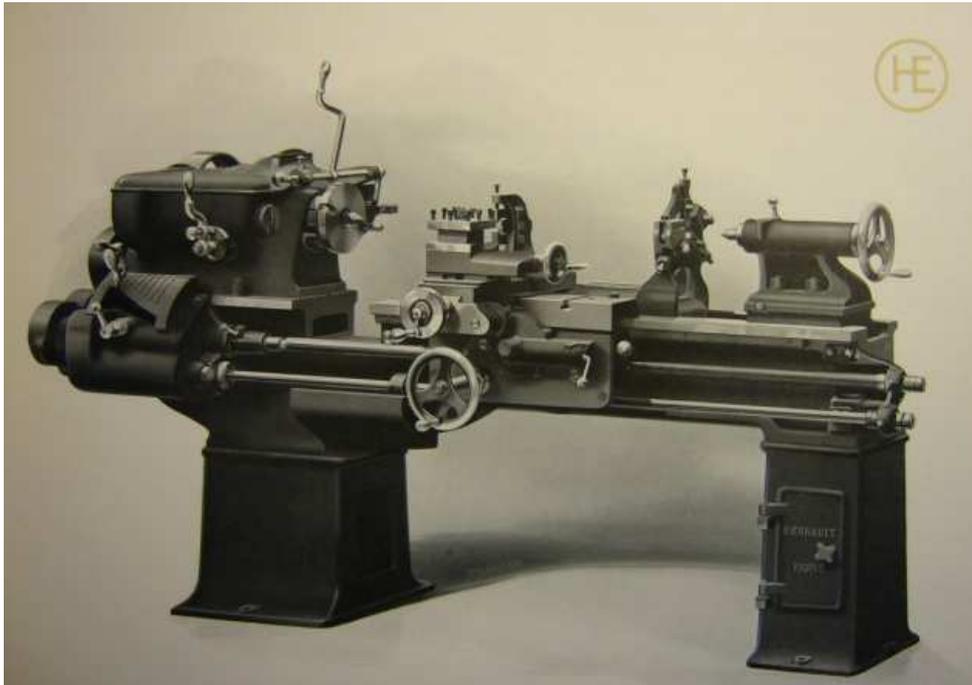
Le tournage est une opération d'usinage permettant de réaliser des géométries de révolution, ainsi que des filetages. Au contraire de la fraiseuse, c'est ici la pièce à usiner qui, placée dans le mandrin de la machine, est mise en rotation. L'outil peut quant à lui être déplacé suivant la direction de l'axe de rotation, suivant la perpendiculaire à l'axe de rotation, et être orienté (rotation dans le plan défini par les deux mouvements de translation possibles).

La vitesse relative entre l'outil et la pièce, la vitesse de coupe, est fonction notamment de la vitesse de rotation de la pièce, mais également du diamètre de la pièce au contact de l'outil.

La quantité de matière enlevée par l'outil, définie par la profondeur de coupe, est également un paramètre important.

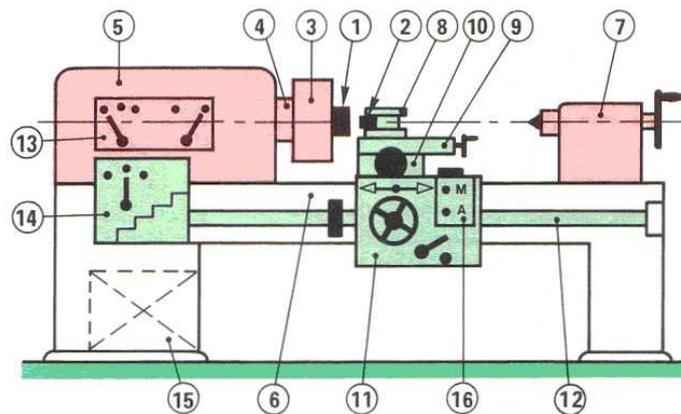
## Constitution de la machine

L'image ci-dessous illustre un exemple de tour parallèle.



*Exemple d'un tour parallèle*

On distingue deux groupes d'organes importants : ceux qui supportent la pièce, et ceux qui supportent l'outil.



*Principaux organes du tour*

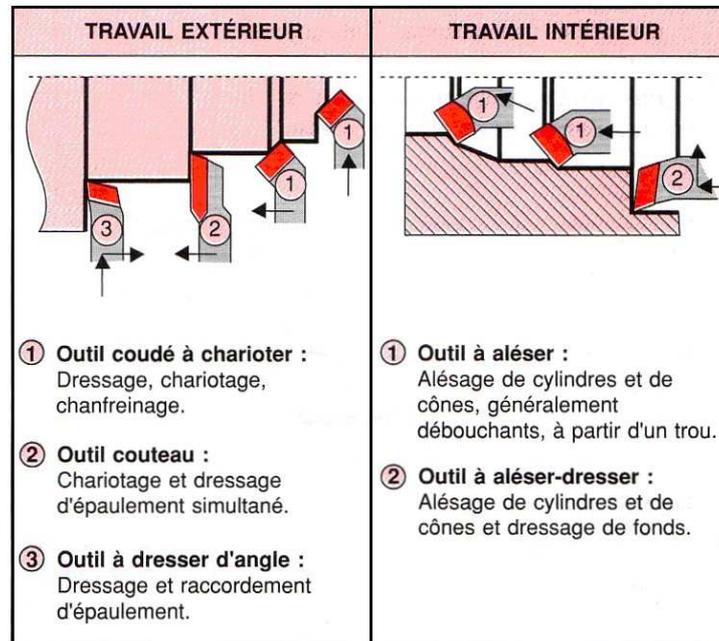
Organes supports de pièce : (1) Pièce ; (3) Mandrin ; (4) Broche ; (5) Poupée fixe ; (7) Poupée mobile

Organes supports d'outil : (2) Outil ; (6) Banc ; (8) Tourelle porte-outils ; (9) Chariot supérieur ; (10) Chariot transversal ; (11) Trainard

Organes permettant le réglage des vitesses : (12) Barre de chariotage ; (13) Boite des vitesses ; (14) Boite des avances ; (15) Moteur ; (16) Contacteur.

## Outillages

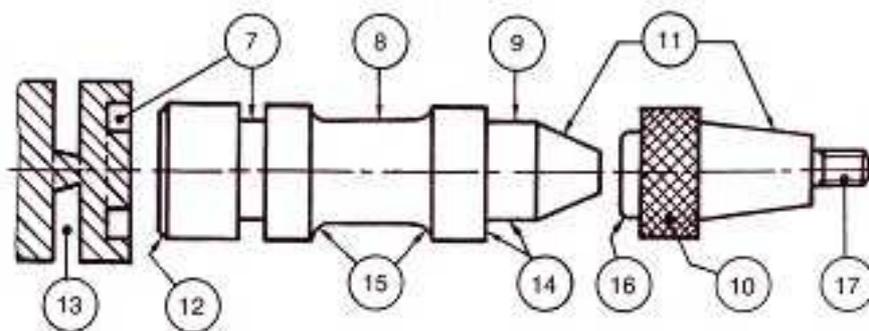
Les outils sont fixés sur la tourelle porte-outils. Ils ont un corps prismatique qui permet d'assurer la fixation. La partie active peut être en acier rapide ou en carbure. Il existe des outils et des positions de fixation sur la tourelle propre à un usinage à l'extérieur de la pièce, et d'autres propre à un usinage à l'intérieur de la pièce.



Exemples d'outils pour usinage à l'intérieur et à l'extérieur de la pièce

## Identification d'éléments tournés

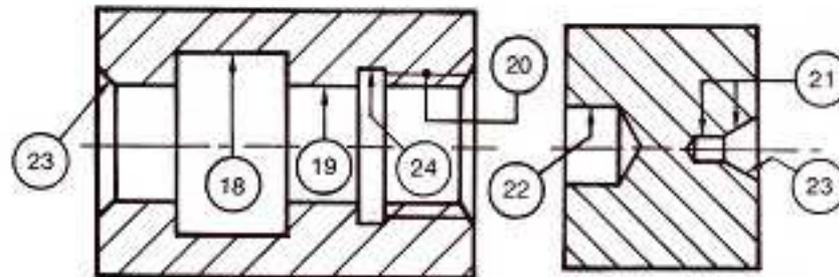
### Surfaces extérieures



- Gorge frontale et radiale (7)
- Évidement (8)
- Portée (9)
- Moletage (10)
- Cône (11)
- Chanfrein (12)
- Saignée (13)
- Épaulement (14)

- Rayon (15)
- Congé (16)
- Filetage (17)

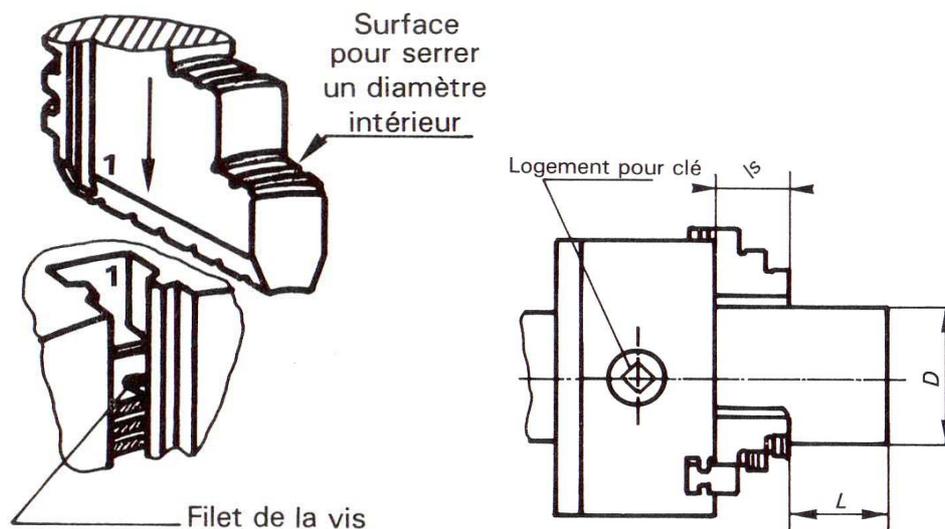
### Surfaces intérieures



- Chambrage (18)
- Alésage (19)
- Filetage (20)
- Centre (21)
- Perçage (22)
- Cône (23)
- Gorge (24)

### Montage de la pièce

La pièce doit être montée dans les mors du mandrin. Il faut que la pièce, une fois montée, soit coaxiale à l'axe de rotation de la broche. Les mors comportent des surfaces pour le montage des pièces en les serrant sur l'extérieur ou sur l'intérieur.



Les mors sont serrés à l'aide d'une clef. Il existe des mandrins sur lesquels les 3 mors sont serrés simultanément, d'autres, plus difficiles à régler, où les 3 mors sont serrés individuellement.

Pour monter la pièce, il faut :

- Ouvrir le mors suffisamment pour laisser passer la pièce.

- Régler la longueur  $L$  de sortie de pièce pour usinage.
- Pour obtenir un serrage convenable de la pièce, vérifier que :
  - $l_s/D \geq 0,6$  avec  $l_s$  = longueur de serrage
  - La longueur de dépassement  $L$  ne doit pas excéder  $2 D$ .
- La longueur réduite de la prise de mors permet l'usinage de pièce d'une longueur  $L$  jusqu'à  $10 l_s$ , les 3 points d'appuis étant prioritaires.

### Montage de l'outil

Le montage de l'outil est une opération délicate, car il faut notamment s'assurer que le plan de déplacement de l'extrémité de l'outil coïncide avec l'axe de rotation. Si ce n'est pas le cas, par exemple si l'outil se trouve légèrement trop bas, il ne sera pas possible de dresser complètement une face : il restera toujours une zone inaccessible à l'outil.

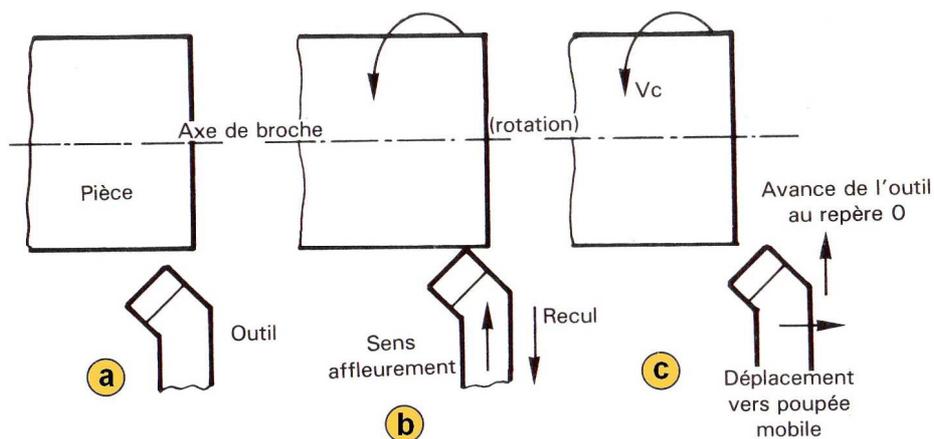
### Opérations réalisables au tour

#### Chariotage

Opération d'usinage qui consiste à réaliser toutes les surfaces de révolution par travail d'enveloppe. C'est la trajectoire de l'outil qui donne la forme de la surface.

#### Préparation

- Monter la pièce.
- Choisir l'outil.
- Monter et régler l'outil.
- Approcher l'outil de la pièce en actionnant les chariots transversal et longitudinal (a).
- Sélectionner la fréquence de rotation de la broche et la vitesse d'avance.
- S'assurer du sens convenable de l'avance.
- Débloquer le tambour gradué du chariot transversal.

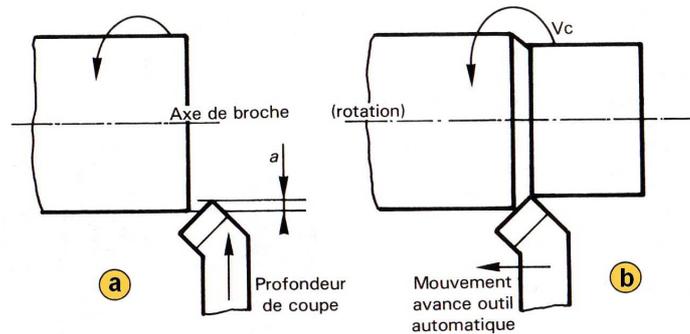


#### Réglage outil-pièce (b)

- Mettre la pièce en rotation dans le sens correct.
- Affleurer la pièce avec le bec de l'outil par le chariot transversal.
- Mettre le tambour gradué du C.T. au 0 et le bloquer.
- Reculer l'outil pour éviter le frottement sur la pièce.

- Déplacer l'outil vers la poupée mobile (fig. 2c).
- Avancer l'outil au repère 0 du tambour gradué.

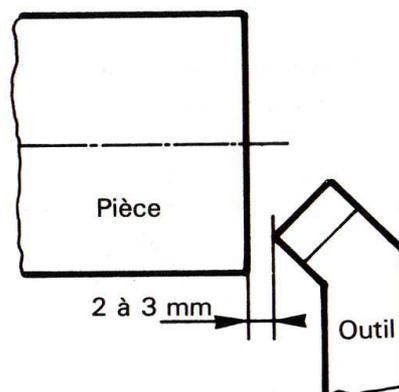
### Usinage



- Avancer l'outil vers l'axe de la broche de la valeur  $a$  (profondeur de coupe).
- Approcher l'outil de la pièce manuellement.
- Enclencher l'avance automatique.
- En fin de passe, veiller à ce que l'outil ne se trouve pas accroché par les mors (voir ci-dessous),
- prévoir une sécurité de deux millimètres par réglage de la butée de banc.
- Reculer l'outil.
- Reprendre jusqu'à obtenir la dimension.

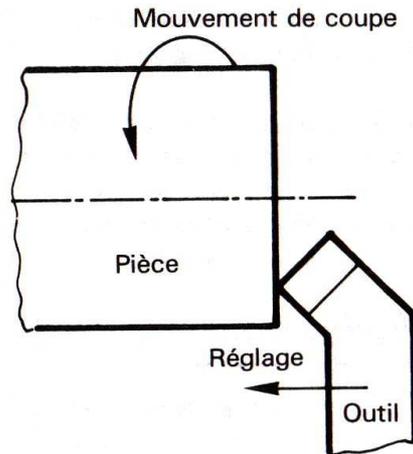
### Dressage (Surfaçage plan)

Opération d'usinage qui consiste à réaliser une surface plane par déplacement rectiligne perpendiculaire à l'axe de révolution de la pièce.



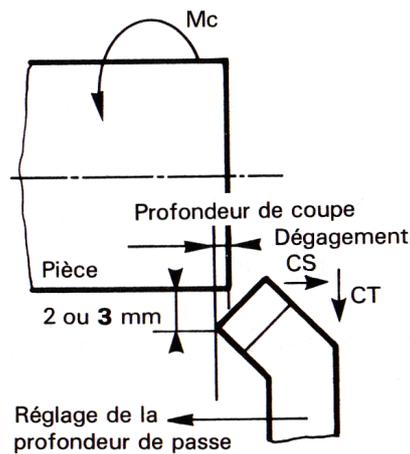
- Monter la pièce.
- Choisir l'outil et le régler.
- Régler la fréquence de rotation et la vitesse d'avance.
- S'assurer du sens de déplacement convenable de l'avance (outil vers l'axe de la broche).
- Approcher le bec de l'outil de 3 à 5 mm de la pièce.
- Bloquer le chariot longitudinal.
- Débloquer le tambour gradué du chariot supérieur.

## Affleurement



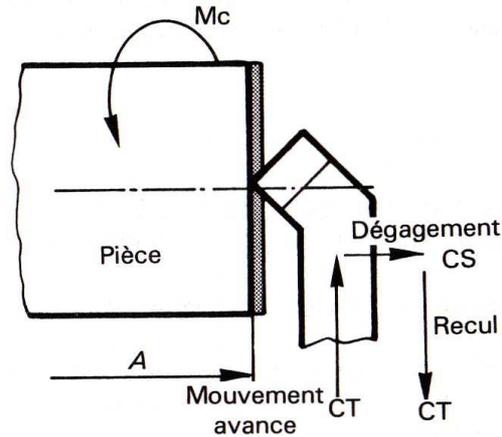
- Mettre la broche en rotation.
- Venir affleurer la pièce avec l'outil en déplaçant le chariot supérieur (CS).
- Mettre le tambour gradué à 0 et le bloquer.

## Prise de profondeur de coupe



- Dégager l'outil avec le chariot supérieur (CS) puis le chariot transversal (CT) à 2 ou 3 mm de la pièce.
- Approcher l'outil de la pièce avec le chariot supérieur au 0 et prendre la profondeur de coupe prévue.
- Approcher l'outil de la pièce avec le chariot transversal actionné manuellement.

## Usinage et contrôle



- Réaliser l'usinage par avance automatique jusqu'au centre.
- Reculer l'outil avec le C.S.
- Revenir en arrière avec le C.T.
- Arrêter la rotation de la broche et mesurer A (avec ou sans démontage de la pièce).
- S'il y a lieu, avancer le C.S. au repère de la prise de passe.
- Prendre une nouvelle profondeur.
- Recommencer l'opération jusqu'à l'obtention de la dimension.

### Perçage – Centrage

C'est un procédé d'usinage économique et rapide qui permet l'ébauche des alésages, l'exécution des diamètres de perçage avant taraudage. L'outil appelé foret, est généralement hélicoïdal et l'angle d'inclinaison d'hélice et l'angle de pointe sont choisis en fonction du matériau usiné.

#### Réglage outil-pièce

- Monter l'outil sur le mandrin de la poupée mobile
- Régler la fréquence de rotation  $V_c=2/3$  de  $V_c$  du chariotage.
- Avancer la poupée mobile jusqu'à ce que le foret se trouve de 5 à 10 mm de la pièce.
- Bloquer la poupée mobile (levier ou clé).
- Mettre la broche en rotation.
- Avancer l'outil vers la pièce par le fourreau commandé par la manivelle.

#### Exécution du perçage

- Lubrification abondante nécessaire.
- Pour trou débouchant, traverser.
- Pour trou borgne, repérer par le vernier la cote de départ de la partie cylindrique.
- Percer jusqu'à profondeur prévue.
- Si la profondeur à percer est 4 fois supérieure au diamètre D à percer, dégager souvent pour assurer le retrait des copeaux et le refroidissement de la partie active du foret.

#### Précaution avant perçage

Contrôler la rotation du foret. La pointe doit tourner concentrique à l'axe de la broche.

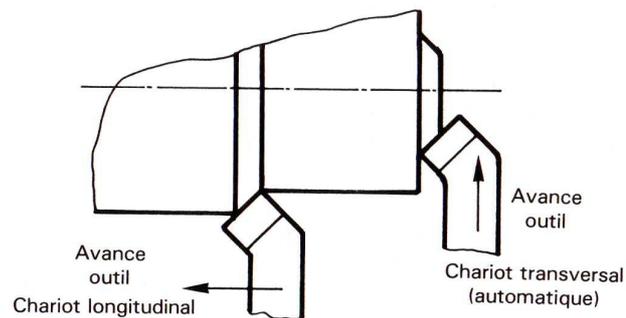
Il est préférable d'effectuer un centrage (utilisation d'un foret à centrer) avant la réalisation du perçage.



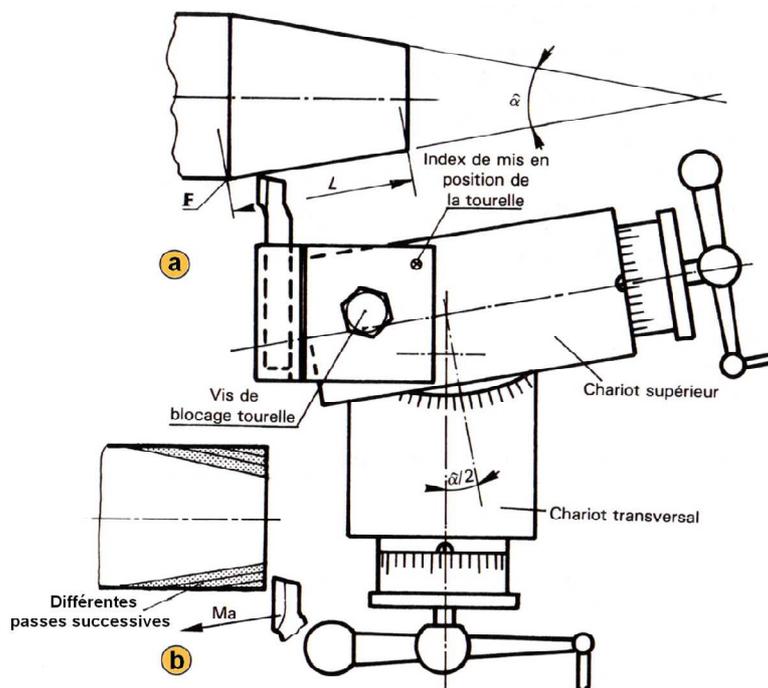
Foret à centrer

### Usinage de 2 surfaces perpendiculaires associées

- L'outil à charioter coudé à 45° permet de réaliser ces surfaces, chariotage ou cylindrage.
- Surfaçage plan ou dressage de face.
- La perpendicularité des deux faces est réalisée sans démontage de la pièce



### Usinage d'un cône

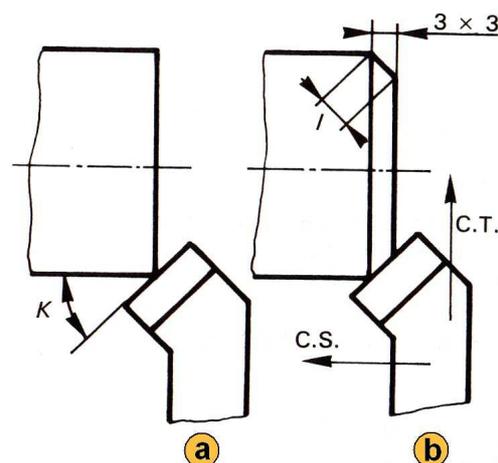


- Calculer le demi-angle au sommet  $\alpha / 2$ .
- Débloquer le chariot supérieur pour lui permettre de prendre l'inclinaison désirée (une vis de blocage peut être cachée sous la glissière du chariot supérieur, le reculer pour la découvrir).
- Incliner le chariot supérieur à la graduation correspondante à l'angle  $\alpha / 2$ .
- Rebloquer les vis.

- Ramener le chariot supérieur sur la longueur de ses glissières.
- Monter et régler l'outil à hauteur de pointe.
- Avancer l'outil avec le chariot supérieur à hauteur du point F correspondant à environ la longueur  $L$  du cône (voir figure)
- Vérifier si la longueur  $L$  du cône est inférieure à la course du chariot par manœuvre de celui-ci.
- Calculer la fréquence de rotation et afficher.
- Bloquer le chariot longitudinal.
- Mettre en position l'outil au début du travail (fig. 1b).
- Prendre profondeur de coupe avec le chariot transversal.
- Mettre la broche en rotation.
- Exécuter le cône par déplacement du chariot supérieur manuellement (tourner lentement et régulièrement, le chariot supérieur n'étant pas entraîné par un mouvement automatique).
- Revenir en arrière et recommencer l'opération jusqu'à obtenir  $L$ .

#### Cône de petite valeur (fig. 3)

- Exemple chanfrein à  $45^\circ$  (valable pour  $60^\circ$ ).
- Utiliser un outil d'un angle  $K$  correspondant à l'angle du chanfrein.
- Affleurer la pièce avec l'arête tranchante de l'outil.
- Actionner le chariot transversal ou supérieur pour prendre la dimension.
- Contrôler en mesurant  $l$ .
- Si chanfrein  $3 \times 3$  il est à  $45^\circ$  (2 côtés égaux).
- Alors  $l = 3 \times 1,414$ .
- $l = 4,24$ .
- Certain tour ayant leur C.T. gradué au diamètre il est préférable d'utiliser le C.S., lecture directe de la cote.



#### Alésage

Un alésage peut avoir 3 fonctions :

- Recevoir un élément arbre (ex. poulie).
- Permettre le passage d'un élément arbre sans ajustement (broche de tour).
- Assurer un guidage (fourreau de poupée mobile de tour).

## Réalisation

L'exécution d'un alésage peut être obtenue suivant deux possibilités :

- avec un outil à tranchant unique,
- avec un outil à tranchants multiples (alésoir).

L'ébauche de cet alésage peut être exécutée par :

- moulage (pièces venant de fonderie)
- forgeage (pièces forgées),
- usinage (par perçage, voir ci-dessus).

## Alésage à l'outil à tranchant unique

### *Montage de l'outil*

- Monter l'outil, soit directement sur le porte-outil (corps d'outil prismatique), soit à l'aide de cale en vé ou avec porte-outil spécial (pour outil à corps rond orienter l'arête tranchante).
- Réduire le porte-à-faux au minimum.

### REMARQUES

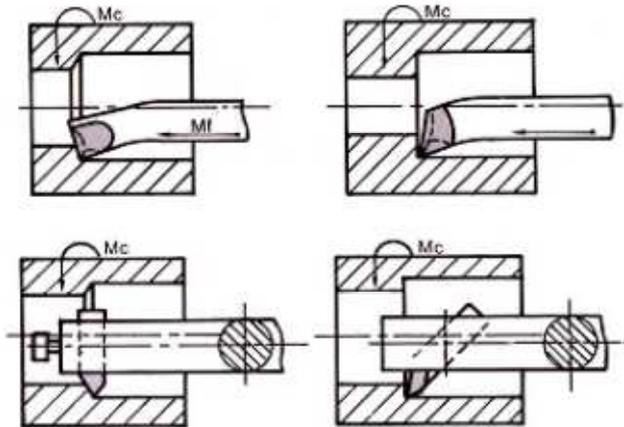
- Un outil monté à l'endroit permet une bonne visibilité de l'arête tranchante et de l'usinage.
- Un outil monté à l'envers permet un bon dégagement du copeau, une prise de passe dans le sens positif du tambour gradué, et également de conserver le réglage du chariot porte-outil dans le cas d'ajustement conique.

### *Conditions de coupe*

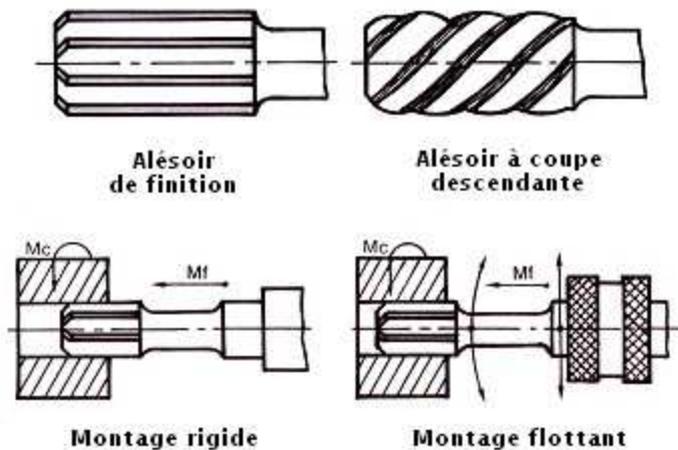
- Vitesse de coupe : prendre les 2/3 de la vitesse de chariotage.
- Avance : suivant le porte-à-faux et la rigidité de l'outil.

### *Mode opératoire*

- Faire affleurer l'outil sur l'alésage ébauché.
- Ébaucher au diamètre  $d - 0,5$  mm.
- Faire une demi-finition à  $d - 0,2$  mm (réaffûter l'outil, si nécessaire).
- Finir au diamètre  $d$  (cote moyenne de préférence). En raison de la flexion de l'outil, faire une ou plusieurs passes à vide.



### Alésage à l'outil à tranchants multiples



### Montage de l'outil

L'alésoir se monte généralement dans la partie conique du fourreau de la poupée mobile (travail unitaire).

Un montage rigide permet des travaux d'ébauche et de demi-finition, car il permet la correction de la rectitude et de la position géométrique de l'axe de l'alésage.

Un montage flottant permet le calibrage du diamètre et un bon état de surface.

### REMARQUE

Très souvent, les opérations d'ébauche et de demi-finition sont remplacées par un usinage à l'outil à tranchant unique, ce qui permet d'assurer la correction de la rectitude et de la position géométrique de l'axe de la pièce.

### Conditions de coupe

- Vitesse de coupe : prendre 1/4 de la vitesse de chariotage,
- Avance : 0,5 à 1 mm par tour (en fonction du diamètre de l'alésoir).

## Travail à préparer avant la séance

On vous demande de :

A. Réaliser la pièce conformément aux indications du dessin.

Pour cela il vous faudra déterminer une méthode de travail :

- Opérations à effectuer et ordre de celles-ci
- Outillage à utiliser
- Vitesses de coupe théoriques (voir tableau ci-dessous)

### Vitesse de coupe pour différent matériaux à usiner

Matériau à usiner	Vc (outil en Acier Rapide Supérieur)	Vc (outil en Carbure)	Usinage Grande Vitesse
Acier (résilient)	15 – 18	60 – 70	-
Acier doux	30 – 38	110 – 140	-
Fonte (moyenne)	18 – 24	70 – 85	-
Bronze	24-45	-	-
Laiton (recuit)	45 – 60	-	-
Aluminium	75 – 400	150 – 1000	2000
Titane	30	60 – 70	-

Lorsque le mouvement de coupe est circulaire, par exemple pour le tour ou la fraiseuse, la fréquence de rotation «n» en tour par minute (tr/min) est déterminée par la formule :

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot d_e}$$

Avec :

- $n$  : fréquence de rotation en tours/minute (tr/min)
- $v_c$  : vitesse de coupe (m/min)
- $\pi$  : constante : 3,14159
- $d_e$  : diamètre de l'outil pour le fraisage et diamètre de la pièce de révolution pour le tournage (mm)

## B. Contrôler la pièce usinée :

Après réalisation, il faudra contrôler les dimensions et tolérances, avec les outils de mesure adéquats. Quel(s) outil(s) allez-vous utiliser ?

### Tolérances générales pour éléments usinés conformément ISO 2768

#### Usinage mm

Classe de précision	Dimension linéaire					Angle cassé (chanfrein ou rayon)				Dimension angulaire (côté le plus court)		
	>0,5 à 3 inclus	>3 à 6	>6 à 30	>30 à 120	>120 à 400	>0,5 à 3 inclus	>3 à 6	>6	≤10	>10 à 50 inclus	>50 à 120	>120 à 400
<b>f (fin)</b>	± 0,05	± 0,05	± 0,1	± 0,15	± 0,2	± 0,2	± 0,5	± 1	± 1°	± 30'	± 20'	± 10'
<b>m (moyen)</b>	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,2	± 0,5	± 1	± 1°	± 30'	± 20'	± 10'
<b>c (large)</b>	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 0,4	± 1	± 2	$\pm 1^{\circ}30'$	± 1°	± 30'	± 15'
<b>v (très large)</b>	—	± 0,5	± 1	± 1,5	± 2,5	± 0,4	± 1	± 2	± 3°	± 2°	± 1°	± 30'

### Tolérances géométriques mm

Classe de précision	Rectitude (—) – Planéité (□)					Perpendicularité (⊥)			Symétrie (≡)			Battement (↗ ↘)
	≤10	>10 à 30 inclus	>30 à 100	>100 à 300	>300 à 1000	≤100	>100 à 300	>300 à 1000	≤100	>100 à 300	>300 à 1000	
<b>H (fin)</b>	0,02	0,06	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,1
<b>K (moyen)</b>	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,4	0,6	0,8	0,6	0,6	0,8	0,2
<b>L (large)</b>	0,1	0,2	0,4	0,8	1,2	0,6	1	1,5	0,6	1	1,5	0,5

### C. Montage du «Pot» sur la «base» :

Pour cela il vous faudra tenir compte à l'usinage :

- Du diamètre de l'alésage de la « base »
- Du tableau des tolérances pour l'usinage du diamètre de l'arbre du «Pot».

### **Déroulement de la séance**

- Discussion sur la procédure d'usinage de la pièce
- Découpe à la scie du barreau pour obtenir le brut avant usinage
- Présentation du tour et des différentes commandes
- Réglage de la pièce dans le mandrin du tour
- Prise de la cote de l'alésage sur la « base »
- Usinage (si nécessaire, régler à nouveau la position de la pièce dans le mandrin)
- Contrôle de la pièce usinée
- Mise en serrage de la pièce dans la base sur la presse hydraulique

## Laboratoire d'assemblage

### Objectif du laboratoire

L'objectif de cette séance est de solidariser les « côtés » sur la plaque de base en utilisant un assemblage par vis. Pour cela, il sera nécessaire de réaliser différents perçages et taraudages. Les opérations d'assemblages sont délicates car il faut faire correspondre des géométries provenant de pièces différentes.

Les opérations à réaliser seront ici :

- perçage de la plaque de base
- perçage des deux plaques latérales
- taraudage des trous réalisés dans les plaques latérales

### A retenir :

- Principe des assemblages filetés
- Réalisation des taraudages, filetages
- Réalisation d'un perçage

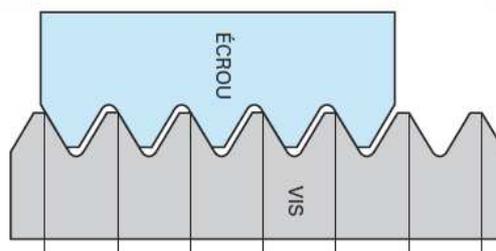
### Introduction théorique à l'assemblage

Il existe de nombreux moyens de réaliser un assemblage mécanique de deux pièces. Nous allons ici nous focaliser sur les assemblages filetés, c'est-à-dire dans notre cas l'utilisation de vis. Remarquons que deux autres techniques d'assemblage sont utilisées dans ce projet : le soudage, et l'ajustement serrant (serrage).

### *Principe d'un assemblage fileté*

Le principe d'un assemblage fileté est de réaliser un filet mâle sur une pièce (la vis par exemple) et de réaliser un filet femelle sur l'autre pièce (l'écrou par exemple). Le filet est une hélice dont le profil peut être variable suivant le type de filet réalisé.

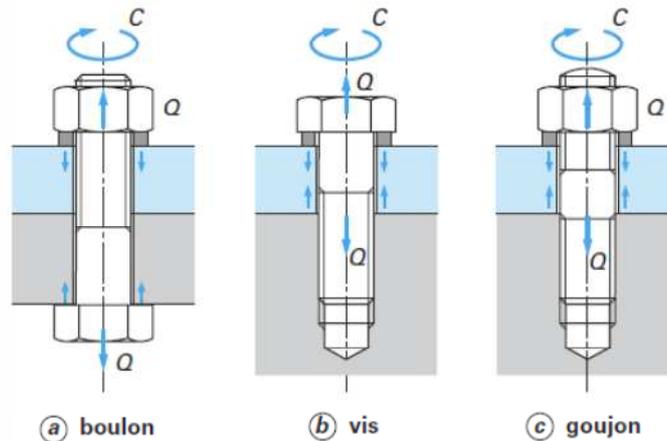
Le filet en lui-même ne solidarise pas les deux pièces. Il faut exercer un serrage qui va plaquer le filet mâle contre le filet femelle. Dans le cas d'un assemblage par vis et écrou par exemple, la tête de la vis est solidaire du filet mâle, et l'écrou porte le filet femelle. Les pièces à solidariser sont serrées entre la tête de la vis et l'écrou. Dans le cas d'un assemblage sans écrou, il est possible de réaliser le filet femelle dans la pièce qui se trouve à l'opposé de la tête de la vis (c'est ce qui sera fait dans le cadre de ce projet).



*Le filet mâle (vis) est plaqué contre le filet femelle (écrou) (J. Guillot, Modélisation et calcul des assemblages vissés, généralités, Technique de l'ingénieur, BM-5-560)*

Retenons que, quel que soit le nombre de pièces à assembler, seule la pièce à l'opposé de la tête de vis doit être filetée. Les autres sont simplement percées, de manière à laisser passer le corps de la vis. Il ne faut pas fileter les pièces intermédiaires, car les filets ne se raccorderont généralement pas d'une pièce à l'autre, ce qui aura pour effet de laisser un espace entre les pièces, qui ne seront donc pas serrées.

La figure ci-dessous illustre 3 types d'assemblage filetés.



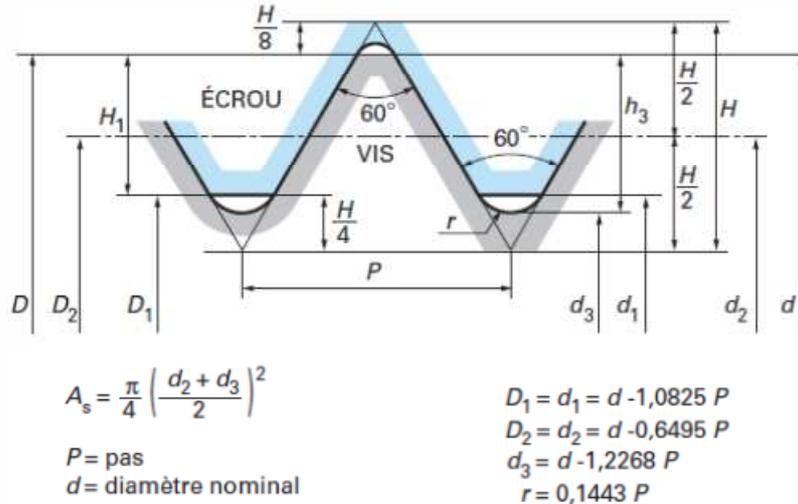
*Types d'assemblages filetés (J. Guillot, Modélisation et calcul des assemblages vissés, généralités, Technique de l'ingénieur, BM-5-560)*

La force de serrage est fonction de la géométrie du filet, et du couple de serrage qui sera appliqué à la vis.

### **Les filetages**

#### **Types de filetages**

Il existe différents types de filetages, qui sont normalisés. Il existe dès lors par exemple un lien entre le pas de l'hélice du filet, et le diamètre de l'hélice. La géométrie du profil est également variable suivant le type de filet (trapézoïdal, en dent de scie, carré,...). Le type de filet que nous allons utiliser est le filet métrique.



*Géométrie d'un filet métrique (J. Guillot, Modélisation et calcul des assemblages vissés, généralités, Technique de l'ingénieur, BM-5-560)*

L'identification d'un filet métrique se fait par la lettre M suivit d'un nombre. Ce nombre désigne le diamètre extérieur au filet (D sur la figure ci-dessus). Ainsi, une vis M6 est une vis dont le filet a un diamètre extérieur de 6mm. La normalisation de ces filets nous donne également le pas. Par exemple pour un filet M6, le pas est de 1mm.

Filetage métrique à pas gros		
M	pas	diamètre avant trou
2	0,4	1,6
2,5	0,45	2,05
3	0,5	2,5
3,5	0,6	2,9
4	0,7	3,3
4,5	0,75	3,8
5	0,8	4,2
6	1	5
7	1	6
8	1,25	6,8
9	1,25	7,8
10	1,5	8,5
11	1,5	9,5
12	1,75	10,3
14	2	12
16	2	14
18	2,5	15,5
20	2,5	17,5

### Réalisation d'un filet

Pour réaliser un filet, qu'il soit mâle ou femelle, on enlève de la matière. Dans le cas d'un filet mâle, il faut donc partir d'un barreau cylindrique dont le diamètre est égal au diamètre extérieur du filet.

Cette opération est appelée *filetage*, et l'outil utilisé est une *filière*. Dans le cas d'un filet femelle, il faut réaliser préalablement un trou dont le diamètre est inférieur au diamètre extérieur du filet. Ce diamètre est appelé diamètre d'avant-trou et est également tabulé en fonction de la taille du filet. Par exemple, pour un filet M6, le diamètre d'avant-trou est de 5mm.

Les tarauds de bonne qualité sont en général au nombre de 3, le premier pour réaliser l'ébauche, le deuxième pour réaliser la passe principale, et le troisième pour la passe de finition. Ceux-ci sont identifiés à l'aide d'un numéro ou d'un nombre de traits sur leur queue (1 trait : ébauche, 0 trait : finition).



*Exemple de taraud (à gauche) et de filière (à droite)*

Lors de l'utilisation de ces outils, il convient de tourner dans le sens d'avance pendant un demi-tour à un tour, puis de revenir en arrière d'un quart de tour afin de casser le copeau qui est généré. Il est également important d'utiliser un lubrifiant.

Il est également important, surtout pour l'opération de taraudage, de guider correctement le taraud. Pour cela, on peut s'aider d'une équerre. Parfois, les queues des tarauds sont pointues, ce qui permet de placer cette pointe dans le mandrin de la perceuse qui a réalisé le trou.

### Mesure d'un filet

Il existe des peignes-calibres qui permettent de vérifier quel est le type d'un filet.

### *Perçage*

#### Présentation de la machine

La perceuse est un outil muni d'une broche dont la vitesse de rotation est variable. Sur cette broche est placé un mandrin qui permet de tenir les outils. La broche peut être déplacée suivant la direction de l'axe de rotation. Ce déplacement est réalisé manuellement à l'aide d'un levier sur le côté de la machine.

#### Présentation des outils

#### *Forets*

Pour le perçage de trous, les outils utilisés sont des forets. Des exemples de forets sont illustrés ci-dessous.



*Exemples de forets*

Les forets sont différents des fraises cylindriques. D'une part, ils ne sont capables d'enlever de la matière qu'à leur tête, ce qui autorise seulement le déplacement de l'outil suivant l'axe de rotation. D'autre part, le profil de leur tête et l'hélice permettent d'évacuer facilement les copeaux, ce qui autorise des vitesses d'avance généralement plus élevées que pour les fraises.

Il y a un certain nombre de choses à savoir sur l'utilisation des forets :

- On considère généralement qu'il est possible de percer des trous à l'aide de forets jusqu'à un rapport d'aspect de 10, donc une profondeur égale à maximum 10 fois le diamètre.
- Dans le cas où le perçage est profond, il convient de ressortir régulièrement le foret afin de briser le copeau et de faciliter son évacuation. Dans le cas contraire, il peut se créer un bourrage, c'est-à-dire une accumulation de matière à la pointe de l'outil.
- Le perçage est facilité si l'on emploie un lubrifiant entre l'outil et la pièce. Ce liquide pourra également faciliter l'évacuation de la chaleur dégagée par l'enlèvement de matière.
- La vitesse de rotation de la broche est fonction du diamètre de l'outil employé. En effet, il faut conserver une vitesse relative entre la pièce et l'outil relativement constante. De ce fait, il est nécessaire de faire tourner la broche plus rapidement si l'outil utilisé est de petit diamètre.
- Les forets de gros diamètres (à partir de 6mm environ) ne doivent pas être utilisés directement dans un volume. Il est préférable de réaliser préalablement un trou de diamètre inférieur. Ainsi, l'outil aura moins de matière à évacuer. Il est important, lorsqu'on est amené à utiliser des forets de diamètres croissants, de conserver le positionnement de la pièce par rapport à l'axe de la broche, afin de s'assurer que les différents trous seront coaxiaux.
- Si la pièce n'est pas encore percée, il est important de faciliter le guidage du foret réalisant le premier trou. Pour cela, on réalise une marque à l'aide d'un pointeau. La pointe du foret se placera dans cette marque, ce qui évitera qu'il ne glisse latéralement lorsqu'on pousse celui-ci dans la matière.

#### *Outil à chanfreiner*

L'outil à chanfreiner, illustré ci-dessous, permet de facilement chanfreiner un trou. Le chanfrein ainsi réalisé permettra, par exemple, de faciliter l'insertion d'une pièce, ou dans notre cas de noyer la tête d'une vis. L'utilisation de cet outil permet également d'ébavurer l'arête du trou réalisé.



*Outil à chanfreiner*

## Mode opératoire pour la réalisation d'un perçage

### *Localisation du perçage*

Le perçage doit être localisé précisément sur la pièce usinée. Or la perceuse n'est généralement pas munie d'une table de translation dans le plan orthogonal à l'axe de l'outil. De plus, nous avons vu plus haut qu'il était nécessaire de pointer la pièce. La localisation du perçage revient donc à localiser le coup de pointe à réaliser.

Pour cela, on utilise le trusquin, appareil permettant de tracer (graver même) sur la pièce des lignes à une distance d'un plan de base (un marbre) choisie par l'opérateur.



*Exemple de trusquin*

Le perçage doit être localisé par rapport à deux faces, par exemples orthogonales, de manière à pouvoir tracer au trusquin deux droites qui s'intersecteront à l'endroit précis où le perçage doit être réalisé.

La pointe du pointeau devra être posée sur l'intersection des deux traits. Ensuite, le pointeau sera relevé et on le frappera une seule fois.

### *Fixation du foret sur la perceuse*

Le foret doit être placé dans le mandrin. Il est important de vérifier visuellement, à vide, qu'il n'y a pas de voilage de l'outil (soit parce que l'outil a été mal placé dans le mandrin, soit parce que l'outil est voilé, n'est plus cylindrique). Cela peut se faire en observant la pointe du foret, qui ne doit pas osciller lorsque la broche est en rotation.

Le reste des réglages se fera machine arrêtée.

### *Positionnement de la pièce sur la machine*

La pièce sera tenue dans un étau. Il est important de veiller à la planéité de la pièce dans l'étau, afin d'effectuer un perçage qui sera bien orthogonal à la surface de la pièce.

Amener ensuite la marque faite au pointeau sous la pointe du foret. Attention à la parallaxe !

### *Repérage de la position verticale*

Si le trou doit être débouchant, il n'est pas important de repérer la position verticale. Il faut dans ce cas veiller à ce que le système qui tient la pièce ou le bâti de la machine ne sera pas endommagé par le foret lorsqu'il débouchera de la pièce.

Si le trou est borgne (non débouchant), la profondeur du perçage doit être contrôlée. Pour cela, il faut amener la pointe du foret en contact avec la pièce, et repérer la position en z de la machine. Attention qu'après un changement du foret, ce réglage doit être refait, puisque la position verticale du foret dans le mandrin n'est pas univoque.

### *Réglage de la vitesse de la machine*

Suivant le matériau usiné et le diamètre de l'outil, réglez la vitesse de rotation de la broche.

### *Lubrification*

Placer une goutte de lubrifiant sur la marque réalisée au pointeau, ou sur le foret.

### *Perçage*

Mettre la machine en marche, et réaliser le perçage. Attention à briser régulièrement le copeau en ressortant le foret du trou.

### **Notion de serrage au couple**

Lorsque la force exercée par la vis sur la pièce assemblée doit être maîtrisée, il est possible de faire ce que l'on appelle un serrage au couple. Il existe en effet un lien entre la force exercée par les filets et le couple appliqué à la vis lors du serrage.

Un outil spécialisé, appelé clef dynamométrique, permet de déterminer le couple appliqué sur une vis, et de maîtriser ainsi la force de serrage.

En mécanique automobile, un bon exemple de serrage au couple concerne la fixation de la culasse d'un moteur sur le bloc moteur. Vu les contraintes mécanique s'exerçant entre la culasse et le bloc, il est important de maîtriser et de répartir les contraintes mécanique dues au serrage.

### **Travail à préparer avant la séance**

- Lire l'introduction générale, en particulier les informations sur les instruments de mesure
- Détermination des cotes importantes sur les plans. Quelles sont les faces de référence que vous allez utiliser ? (cf traçage au trusquin).
- Réflexion : Comment allez-vous tenir la pièce lors des différentes opérations ?

### **Déroulement de la séance**

- Discussion sur la méthode d'assemblage et sur les opérations à réaliser
- Présentation des outils et machines
- Utilisation du trusquin et traçage
- Pointage des positions des trous
- Perçage des trous
- Réalisation des taraudages dans les pièces adéquates
- Assemblage et serrage
- Conclusions



## Bibliographie

- Cartier, M., & Kapsa, P. (2001). Usure des contacts mécaniques - Maîtrise de l'usure et du frottement. Techniques de l'Ingénieur , BM 5 068.
- Nica Dorina, Fabrication de pièce d'usinage simple en tournage, édité par l'OFPPT, Royaume du Maroc
- J. Guillot, Modélisation et calcul des assemblages vissés, généralités, Technique de l'ingénieur, BM-5-560

# Norme pour le tolérancement

E 020.200  
CDU 621.753.21100  
Avril 1959

## Tolérances et ajustements ISO Dimensions nominales ≤ 500 mm

### Tolérances et écarts fondamentaux

Tolérance :  $T$   
Cotes limites : ...  
Cote maximale :  $M$   
Cote minimale :  $m$

Cote nominale :  $N$   
Ecart : ...  
Ecart supérieur :  $ES, es$   
Ecart inférieur :  $EI, ei$

**Tolérances fondamentales:**

Les écarts de vérification sont donc :

$es_v = es - \alpha$  ou  $es_v = ei + (T - \alpha)$   
 $EI_v = EI - (T - \alpha)$  ou  $EI_v = EI + (T - \alpha)$

Les valeurs de  $T$  et de  $\alpha$  sont calculées par les formules :

$T = \alpha + q$   
 $\alpha = (0,001N - 0,25)q$

dans lesquelles le coefficient  $q$  prend pour les qualités 5 à 16 les valeurs 7, 10, 16, 25, 40, 64, 100, 160, 250, 400, 640 et 1 000.

Les valeurs des écarts fondamentaux sont calculées à partir des formules suivantes dans lesquelles  $N$  représente la moyenne géométrique entre les cotes extrêmes de chaque palier de dimensions nominales (b). Les valeurs ainsi calculées sont valables pour toutes les dimensions du palier considéré.

Dimensions nominales mm	Tolérances en $\mu$																	
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
—	1	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	—	—
1	3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400
3	6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480
6	10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580
10	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700
18	30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840
30	50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000
50	80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200
80	120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400
120	180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600
180	250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850
250	315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100
315	400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300
400	500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500

Source : NBN 101 et 103 - 1948; conclusions ISO/TC 3 - 1957

E 020.110  
CDU 621.753.21  
Décembre 1946

## Tolérances et ajustements Dimensions nominales > 500 mm GENERALITES (a)

Les écarts fondamentaux et la tolérance sont reliés par les relations suivantes :

$es = EI + T$  et  $EI = ES - T$   
 $ei = es - T$  et  $EI = ES - T$

Les écarts de vérification sont donc :

$es_v = es - \alpha$  ou  $es_v = ei + (T - \alpha)$   
 $EI_v = EI - (T - \alpha)$  ou  $EI_v = EI + (T - \alpha)$

Les valeurs de  $T$  et de  $\alpha$  sont calculées par les formules :

$T = \alpha + q$   
 $\alpha = (0,001N - 0,25)q$

dans lesquelles le coefficient  $q$  prend pour les qualités 5 à 16 les valeurs 7, 10, 16, 25, 40, 64, 100, 160, 250, 400, 640 et 1 000.

Les valeurs des écarts fondamentaux sont calculées à partir des formules suivantes dans lesquelles  $N$  représente la moyenne géométrique entre les cotes extrêmes de chaque palier de dimensions nominales (b). Les valeurs ainsi calculées sont valables pour toutes les dimensions du palier considéré.

Symbolique

Symbolique	Ecart fondamental (es, et EI en $\mu$ m et N en mm)
H	$EI = 0$
h	$es = -60i$
d	$es = -36i$
f	$es = -18i$
g	$es = -(IT7 - IT6)$
h	$es = 0$
js	$ei = \pm 0,5 IT$
k	$ei = 0$
m	$ei = + (IT7 - IT6)$
n	$ei = + 10i$
p	$ei = + (IT7 + 2i)$
r	$ei = + (IT7 + 0,125N)$
s	$ei = + (IT7 + 0,4N)$
t	$ei = + (IT7 + 0,63N)$
u	$ei = + (IT7 + N)$
v	$ei = + (IT7 + 1,25N)$
x	$ei = + (IT7 + 2N)$
y	$ei = + (IT7 + 4N)$
z	$ei = + (IT7 + 8,5N)$

Limites de la pièce de vérification

Ligne zéro

Les valeurs admises pour la tolérance fondamentale  $IT$ , le facteur pour le calcul des limites de vérification  $k$ , et les écarts fondamentaux varient linéairement en fonction de la cote nominale  $N$ ; ces lois linéaires se raccordent à celles plus complexes admises pour les valeurs de  $N$  égales ou inférieures à 500 mm. (a)

L'unité de tolérance  $i$  est définie par la relation :

$i = 0,004N + 2i$  (avec  $i$  en  $\mu$  m et  $N$  en mm)

(a) Voir feuilles E 020.000 à E 020.101 - Système de tolérances ISO pour dimensions inférieures à 500 mm.  
 (b) Seul pour les valeurs des écarts fondamentaux des types  $js, h$  et  $m$ , calculés directement à partir des valeurs de  $IT$ , les autres valeurs ont été lésées en suivant la règle d'arrondissement ci-après :

Dimensions en $\mu$ m	au-dessus de	jusqu'à	Arrondies en multiples de
—	50	100	20
100	200	500	50
500	1000	2000	1000
2000	5000	10000	2000
10000	20000	50000	5000
50000	100000	200000	10000
200000	500000	1000000	20000
1000000	2000000	5000000	50000
5000000	10000000	20000000	100000
20000000	50000000	100000000	200000
100000000	200000000	500000000	500000
200000000	500000000	1000000000	1000000

Source : NBN 137 - 2<sup>e</sup> édition (en préparation) identique à ABS 137 - 1945.  
 N.B. - En attendant que la Recommandation provisoire ISO/TC3 couvrant le domaine de 500 mm à 1 500 mm soit complétée, les tolérances fondamentales des types  $js, h$  et  $m$ , calculées directement à partir des valeurs de  $IT$ , les autres valeurs ont été lésées en suivant la règle d'arrondissement ci-après :  
 ABS 137 et 139 (légendes) en conservant les bases antérieures, c'est-à-dire une extrapolation au-delà de 500 mm de l'ancien système SA (devenu ISO).  
 La Commission croit en effet que l'établissement des paliers de dimensions nominales de la Recommandation provisoire ISO soit trop large et crée des difficultés aux limites de tolérances de 500 mm. Elle a donc décidé que les écarts fondamentaux des types  $js, h$  et  $m$  proposés par l'ISO au-delà de 500 mm sont trop directs.

Source : NBN 101 et 103 - 1948; conclusions ISO/TC 3 - 1957

Tolérances et ajustements ISO  
Dimensions nominales ≤ 500 mm  
Tolérances et écarts fondamentaux

Avril 1959

Écarts fondamentaux des arbres (a à j)

Écarts en $\mu$ Dimensions nominales en mm ou jus- qu'à dp	Écarts supérieurs : et)											Écarts inférieurs :		
	Types											Qualités		
	a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	i	5-6	7
1	—	—	—60	—34	—20	—14	—10	—6	—4	—2	0	—2	—4	—4
3	—270	—140	—60	—34	—20	—14	—10	—6	—4	—2	0	—2	—4	—4
6	—270	—140	—70	—46	—30	—20	—14	—10	—6	—4	0	—2	—4	—4
10	—280	—150	—80	—56	—40	—25	—18	—13	—8	—5	0	—2	—5	—5
14	—290	—150	—95	—	—50	—32	—	—16	—	—6	0	—3	—6	—6
18	—300	—160	—110	—	—65	—40	—	—20	—	—7	0	—4	—8	—8
24	—310	—170	—120	—	—80	—50	—	—25	—	—9	0	—5	—10	—10
30	—320	—180	—130	—	—100	—60	—	—30	—	—10	0	—7	—12	—12
40	—340	—190	—140	—	—120	—72	—	—36	—	—12	0	—9	—15	—15
50	—360	—200	—150	—	—140	—85	—	—43	—	—14	0	—11	—18	—18
65	—400	—220	—170	—	—170	—100	—	—50	—	—15	0	—13	—21	—21
80	—460	—260	—200	—	—210	—110	—	—56	—	—17	0	—16	—26	—26
100	—520	—310	—230	—	—250	—125	—	—62	—	—18	0	—18	—28	—28
120	—580	—360	—260	—	—300	—140	—	—68	—	—20	0	—20	—32	—32
140	—640	—420	—300	—	—360	—160	—	—76	—	—22	0	—22	—36	—36
160	—700	—480	—340	—	—420	—180	—	—84	—	—24	0	—24	—40	—40
180	—760	—540	—380	—	—480	—200	—	—92	—	—26	0	—26	—44	—44
200	—820	—600	—420	—	—540	—220	—	—100	—	—28	0	—28	—48	—48
225	—880	—660	—460	—	—600	—240	—	—110	—	—30	0	—30	—52	—52
250	—940	—720	—500	—	—660	—260	—	—120	—	—32	0	—32	—56	—56
280	—1000	—780	—540	—	—720	—280	—	—130	—	—34	0	—34	—60	—60
315	—1050	—840	—580	—	—780	—300	—	—140	—	—36	0	—36	—64	—64
355	—1100	—900	—620	—	—840	—320	—	—150	—	—38	0	—38	—68	—68
400	—1150	—960	—660	—	—900	—340	—	—160	—	—40	0	—40	—72	—72
450	—1200	—1020	—700	—	—960	—360	—	—170	—	—42	0	—42	—76	—76
500	—1250	—1080	—740	—	—1020	—380	—	—180	—	—44	0	—44	—80	—80

NORMALIEN FABRIMETAL — E 020.202 — élaboré par la Société Belge des Mécaniciens et agréé par l'Institut Belge de Normalisation.

Source : NBN 101 à 103 - 1948; conclusions ISO/TC 3 - 1957

suite E 020.203

Tolérances et ajustements ISO  
Dimensions nominales ≤ 500 mm  
Tolérances et écarts fondamentaux

Avril 1959

Écarts fondamentaux des arbres (js)

Écarts en $\mu$ Dimensions nominales en mm ou jus- qu'à dp	Écarts fondamentaux : $\left\{ \begin{matrix} es (+) \\ ei (-) \end{matrix} \right.$																
	Types js																
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	±0,15	±0,25	±0,4	±0,6	±1	±1,5	±2	±3	±5	±7,5	±10	±15	±20	±30	±45	±70	±100
3	±0,15	±0,25	±0,4	±0,6	±1	±1,5	±2	±3	±5	±7,5	±10	±15	±20	±30	±45	±70	±100
6	±0,2	±0,3	±0,5	±0,75	±1,25	±2	±3	±4,5	±7,5	±10	±15	±20	±30	±45	±70	±100	±150
10	±0,2	±0,3	±0,5	±0,75	±1,25	±2	±3	±4,5	±7,5	±10	±15	±20	±30	±45	±70	±100	±150
14	±0,25	±0,4	±0,6	±1	±1,5	±2,5	±4	±5,5	±9	±10	±15	±20	±30	±45	±70	±100	±150
18	±0,3	±0,5	±0,75	±1,25	±2	±3,5	±5,5	±8	±12,5	±15	±20	±30	±45	±70	±100	±150	±200
30	±0,3	±0,5	±0,75	±1,25	±2	±3,5	±5,5	±8	±12,5	±15	±20	±30	±45	±70	±100	±150	±200
40	±0,4	±0,6	±1	±1,5	±2,5	±4	±6,5	±9,5	±15	±15	±20	±30	±45	±70	±100	±150	±200
50	±0,4	±0,6	±1	±1,5	±2,5	±4	±6,5	±9,5	±15	±15	±20	±30	±45	±70	±100	±150	±200
80	±0,5	±0,75	±1,25	±2	±3	±5	±7,5	±11	±17,5	±17,5	±20	±30	±45	±70	±100	±150	±200
100	±0,5	±0,75	±1,25	±2	±3	±5	±7,5	±11	±17,5	±17,5	±20	±30	±45	±70	±100	±150	±200
120	±0,6	±1	±1,75	±2,5	±4	±6	±9	±14,5	±23	±23	±26	±36	±54	±81	±120	±180	±270
160	±0,6	±1	±1,75	±2,5	±4	±6	±9	±14,5	±23	±23	±26	±36	±54	±81	±120	±180	±270
200	±0,75	±1,25	±2	±3	±4	±6	±9	±14,5	±23	±23	±26	±36	±54	±81	±120	±180	±270
250	±0,75	±1,25	±2	±3	±4	±6	±9	±14,5	±23	±23	±26	±36	±54	±81	±120	±180	±270
315	±1,5	±2,5	±3,5	±4,5	±6,5	±9	±13,5	±18	±28,5	±28,5	±30	±40	±60	±90	±135	±200	±300
400	±1,5	±2,5	±3,5	±4,5	±6,5	±9	±13,5	±18	±28,5	±28,5	±30	±40	±60	±90	±135	±200	±300
500	±2	±3	±4	±5	±7,5	±10	±15	±20	±31,5	±31,5	±35	±45	±67,5	±100	±150	±225	±337,5

Écarts en  $\mu$

Écarts en $\mu$ Dimensions nominales en mm ou jus- qu'à dp	Écarts fondamentaux : $\left\{ \begin{matrix} es (+) \\ ei (-) \end{matrix} \right.$																
	Types js																
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	±7	±12,5	±20	±30	±50	±70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	±7	±12,5	±20	±30	±50	±70	±125	±200	±300	—	—	—	—	—	—	—	—
6	±9	±15	±24	±37,5	±60	±90	±150	±240	±375	±500	±750	—	—	—	—	—	—
10	±11	±18	±29	±45	±75	±110	±180	±290	±450	±675	±1000	±1500	—	—	—	—	—
16	±13,5	±21,5	±35	±55	±90	±135	±215	±350	±550	±825	±1200	±1800	±2700	—	—	—	—
20	±16,5	±26	±42	±65	±105	±155	±260	±420	±650	±975	±1450	±2150	±3250	±4850	—	—	—
30	±19,5	±31	±50	±80	±125	±195	±310	±500	±750	±1100	±1650	±2450	±3650	±5450	—	—	—
40	±23	±37	±60	±95	±150	±230	±370	±550	±800	±1150	±1700	±2550	±3800	±5650	—	—	—
50	±27	±43,5	±70	±110	±175	±270	±435	±650	±950	±1400	±2100	±3150	±4700	±6950	—	—	—
60	±31,5	±50	±80	±125	±200	±315	±500	±750	±1100	±1650	±2450	±3650	±5450	±8150	—	—	—
75	±36	±57,5	±92,5	±145	±230	±360	±575	±860	±1290	±1935	±2900	±4350	±6525	±9750	—	—	—
90	±40,5	±65	±105	±160	±260	±405	±650	±975	±1450	±2175	±3260	±4890	±7335	±10950	—	—	—
110	±44,5	±70	±115	±180	±285	±445	±700	±1050	±1575	±2360	±3540	±5310	±7965	±11950	—	—	—
140	±48,5	±77,5	±125	±200	±315	±485	±775	±1150	±1725	±2580	±3870	±5700	±8550	±12800	—	—	—

Source : NBN 101 à 103 - 1948; conclusions ISO/TC 3 - 1957

suite E 020.204



**Tolérances et ajustements ISO**  
Dimensions nominales ≤ 500 mm  
**Tolérances et écarts fondamentaux**

**Ecart fondamental des alésages (JS)**

Ecart en $\mu$ Dimensions nominales mm ou jus- sus qu'à de	Ecart fondamental									
	Type JS									
	Qualités									
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	
1	±0,15	±0,25	±0,4	±0,6	±1	±1,5	±2	±3	±5	
3	±0,15	±0,25	±0,4	±0,6	±1	±1,5	±2	±3	±5	
6	±0,2	±0,3	±0,5	±0,75	±1,25	±2	±2,5	±4	±6	
10	±0,2	±0,3	±0,5	±0,75	±1,25	±2	±3	±4,5	±7,5	
16	±0,25	±0,4	±0,6	±1	±1,5	±2,5	±4	±5,5	±9	
30	±0,3	±0,5	±0,75	±1,25	±2	±3	±4,5	±6,5	±10,5	
50	±0,3	±0,5	±0,75	±1,25	±2	±3,5	±5,5	±8	±12,5	
80	±0,4	±0,6	±1	±1,5	±2,5	±4	±6,5	±9,5	±15	
120	±0,5	±0,75	±1,25	±2	±3	±5	±7,5	±11	±17,5	
180	±0,6	±1	±1,75	±2,5	±4	±6	±9	±12,5	±20	
250	±1	±1,5	±2,25	±3,5	±5	±7	±10	±14,5	±23	
315	±1,25	±2	±3	±4	±6	±8	±11,5	±16	±26,5	
400	±1,5	±2,5	±3,5	±4,5	±6,5	±9	±12,5	±18	±28,5	
500	±2	±3	±4	±5	±7,5	±10	±13,5	±20	±31,5	

NORMALIEN FABRIMETAL — E 020.206 — élaboré par la Société Belge des Mécaniciens et agréé par l'Institut Belge de Normalisation.

**Tolérances et ajustements ISO**  
Dimensions nominales ≤ 500 mm  
**Tolérances et écarts fondamentaux**

**Ecart fondamental des alésages (K, M, N)**

Ecart en $\mu$ Dimensions nominales mm ou jus- sus qu'à de	Ecart supérieur : JS																										
	Type K												Type M														
	Qualités												Qualités														
	3	4	5	6	7	8	>8	3	4	5	6	7	8	>8	3	4	5	6	7	8	>8	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
230	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
280	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
315	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
355	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
450	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

NORMALIEN FABRIMETAL — E 020.207 — élaboré par la Société Belge des Mécaniciens et agréé par l'Institut Belge de Normalisation.

Tolérances et ajustements ISO  
Dimensions nominales ≤ 500 mm  
Tolérances et écarts fondamentaux

Avril 1995

Ecart fondamental des alésages (P, R, S, T, U, V)

Ecart supérieur : ES

Dimensions nominales mm	Types																				
	P							R							S						
	3	4	5	6	7	>7	Qualités	3	4	5	6	7	>7	Qualités	3	4	5	6	7	>7	Qualités
1	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14
3	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14
6	-11	-10,5	-11	-9	-8	-12	-14	-13,5	-14	-12	-11	-15	-18	-17,5	-18	-16	-15	-15	-15	-15	-15
10	-14	-13,5	-13	-12	-9	-15	-18	-17,5	-17	-16	-13	-19	-22	-21,5	-21	-20	-17	-17	-17	-17	-17
14	-17	-16	-15	-15	-11	-18	-22	-21	-20	-20	-16	-23	-27	-26	-25	-25	-21	-21	-21	-21	-21
18	-20	-19	-18	-18	-14	-22	-26,5	-26	-25	-24	-20	-28	-33,5	-33	-32	-31	-27	-27	-27	-27	-27
24	-24,5	-23	-22	-22	-17	-26	-32,5	-31	-30	-29	-25	-34	-41,5	-40	-39	-38	-34	-34	-34	-34	-34
30	-29	-27	-26	-26	-21	-32	-41	-40	-38	-37	-32	-43	-57	-56	-54	-53	-48	-48	-48	-48	-48
40	-33	-32	-30	-30	-24	-37	-52	-50	-49	-47	-41	-54	-77	-75	-74	-72	-66	-66	-66	-66	-66
50	-39	-37	-36	-36	-28	-43	-62	-61	-59	-58	-50	-65	-97	-96	-94	-93	-85	-85	-85	-85	-85
65	-46	-44	-43	-43	-33	-50	-74	-73	-71	-70	-60	-80	-127	-126	-124	-121	-113	-113	-113	-113	-113
80	-52	-50	-49	-49	-37	-57	-88	-86	-85	-84	-71	-93	-144	-143	-141	-138	-131	-131	-131	-131	-131
100	-60	-58	-57	-57	-43	-66	-104	-103	-101	-100	-85	-107	-186	-185	-183	-179	-169	-169	-169	-169	-169
120	-68	-66	-65	-65	-47	-74	-124	-123	-121	-120	-99	-131	-224	-223	-221	-217	-207	-207	-207	-207	-207
140	-76	-74	-73	-73	-53	-82	-144	-143	-141	-140	-107	-159	-274	-273	-271	-267	-257	-257	-257	-257	-257
160	-84	-82	-81	-81	-59	-90	-164	-163	-161	-160	-115	-184	-324	-323	-321	-317	-307	-307	-307	-307	-307
180	-92	-90	-89	-89	-61	-98	-184	-183	-181	-180	-125	-214	-384	-383	-381	-377	-367	-367	-367	-367	-367
200	-100	-98	-97	-97	-67	-106	-204	-203	-201	-200	-135	-254	-444	-443	-441	-437	-427	-427	-427	-427	-427
225	-110	-108	-107	-107	-73	-116	-224	-223	-221	-220	-145	-294	-504	-503	-501	-497	-487	-487	-487	-487	-487
250	-120	-118	-117	-117	-79	-126	-244	-243	-241	-240	-155	-334	-564	-563	-561	-557	-547	-547	-547	-547	-547
280	-130	-128	-127	-127	-85	-136	-264	-263	-261	-260	-165	-374	-624	-623	-621	-617	-607	-607	-607	-607	-607
315	-140	-138	-137	-137	-91	-146	-284	-283	-281	-280	-175	-414	-684	-683	-681	-677	-667	-667	-667	-667	-667
355	-150	-148	-147	-147	-97	-156	-304	-303	-301	-300	-185	-454	-744	-743	-741	-737	-727	-727	-727	-727	-727
400	-160	-158	-157	-157	-103	-166	-324	-323	-321	-320	-195	-494	-804	-803	-801	-797	-787	-787	-787	-787	-787
450	-170	-168	-167	-167	-109	-176	-344	-343	-341	-340	-205	-534	-864	-863	-861	-857	-847	-847	-847	-847	-847
500	-180	-178	-177	-177	-115	-186	-364	-363	-361	-360	-215	-574	-924	-923	-921	-917	-907	-907	-907	-907	-907

Ecart supérieur : ES

Dimensions nominales mm	Types																				
	P							R							S						
	3	4	5	6	7	>7	Qualités	3	4	5	6	7	>7	Qualités	3	4	5	6	7	>7	Qualités
1	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14
3	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14
6	-11	-10,5	-11	-9	-8	-12	-14	-13,5	-14	-12	-11	-15	-18	-17,5	-18	-16	-15	-15	-15	-15	-15
10	-14	-13,5	-13	-12	-9	-15	-18	-17,5	-17	-16	-13	-19	-22	-21,5	-21	-20	-17	-17	-17	-17	-17
14	-17	-16	-15	-15	-11	-18	-22	-21	-20	-20	-16	-23	-27	-26	-25	-25	-21	-21	-21	-21	-21
18	-20	-19	-18	-18	-14	-22	-26,5	-26	-25	-24	-20	-28	-33,5	-33	-32	-31	-27	-27	-27	-27	-27
24	-24,5	-23	-22	-22	-17	-26	-32,5	-31	-30	-29	-25	-34	-41,5	-40	-39	-38	-34	-34	-34	-34	-34
30	-29	-27	-26	-26	-21	-32	-41	-40	-38	-37	-32	-43	-57	-56	-54	-53	-48	-48	-48	-48	-48
40	-33	-32	-30	-30	-24	-37	-52	-50	-49	-47	-41	-54	-77	-75	-74	-72	-66	-66	-66	-66	-66
50	-39	-37	-36	-36	-28	-43	-62	-61	-59	-58	-50	-65	-97	-96	-94	-93	-85	-85	-85	-85	-85
65	-46	-44	-43	-43	-33	-50	-74	-73	-71	-70	-60	-80	-127	-126	-124	-121	-113	-113	-113	-113	-113
80	-52	-50	-49	-49	-37	-57	-88	-86	-85	-84	-71	-93	-144	-143	-141	-138	-131	-131	-131	-131	-131
100	-60	-58	-57	-57	-43	-66	-104	-103	-101	-100	-85	-107	-186	-185	-183	-179	-169	-169	-169	-169	-169
120	-68	-66	-65	-65	-47	-74	-124	-123	-121	-120	-99	-131	-224	-223	-221	-217	-207	-207	-207	-207	-207
140	-76	-74	-73	-73	-53	-82	-144	-143	-141	-140	-107	-159	-274	-273	-271	-267	-257	-257	-257	-257	-257
160	-84	-82	-81	-81	-59	-90	-164	-163	-161	-160	-115	-184	-324	-323	-321	-317	-307	-307	-307	-307	-307
180	-92	-90	-89	-89	-61	-98	-184	-183	-181	-180	-125	-214	-384	-383	-381	-377	-367	-367	-367	-367	-367
200	-100	-98	-97	-97	-67	-106	-204	-203	-201	-200	-135	-254	-444	-443	-441	-437	-427	-427	-427	-427	-427
225	-110	-108	-107	-107	-73	-116	-224	-223	-221	-220	-145	-294	-504	-503	-501	-497	-487	-487	-487	-487	-487
250	-120	-118	-117	-117	-79	-126	-244	-243	-241	-240	-155	-334	-564	-563	-561	-557	-547	-547	-547	-547	-547
280	-130	-128	-127	-127	-85	-136	-264	-263	-261	-260	-165	-374	-624	-623	-621	-617	-607	-607	-607	-607	-607
315	-140	-138	-137	-137	-91	-146	-284	-283	-281	-280	-175	-414	-684	-683	-681	-677	-667	-667	-667	-667	-667
355	-150	-148	-147	-147	-97	-156	-304	-303	-301	-300	-185	-454	-744	-743	-741	-737	-727	-727	-727	-727	-727
400	-160	-158	-157	-157	-103	-166	-324	-323	-321	-320	-195	-494	-804	-803	-801	-797	-787	-787	-787	-787	-787
450	-170	-168	-167	-167	-109	-176	-344	-343	-341	-340	-205	-534	-864	-863	-861	-857	-847	-847	-847	-847	-847
500	-180	-178	-177	-177	-115	-186	-364	-363	-361	-360	-215	-574	-924	-923	-921	-917	-907	-907	-907	-907	-907

NORMALIEN FABRIMETAL — Élaboré par la Société Belge des Mécaniciens et agréé par l'Institut Belge de Normalisation.

Source : NBN 101 à 103 - 1948; conclusions ISO/TC 3 - 1957.

suite E 020.209



# Dossier de plans pour le projet

The drawing shows a mechanical assembly with the following components labeled:

- 1: A small cylindrical component at the top of the assembly.
- 2: A long cylindrical shaft with a threaded section.
- 3: A shorter cylindrical shaft with a threaded section.
- 4: A cylindrical component with a central hole, possibly a bush or sleeve.
- 5: Two small rectangular components, likely spacers or washers, positioned on either side of the main assembly.

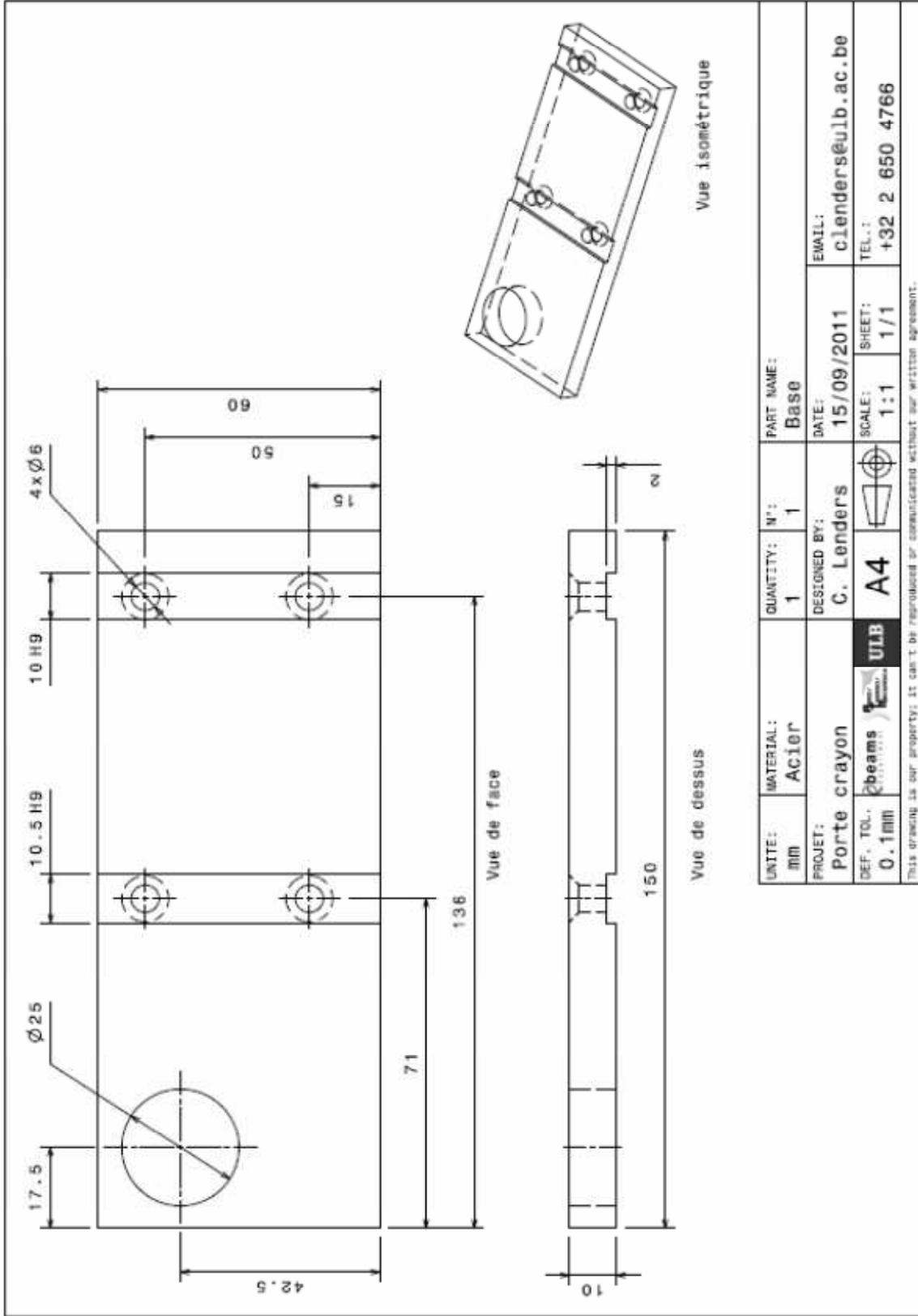
A 3D perspective view of the assembly is shown at the bottom right, illustrating the relative positions of the components.

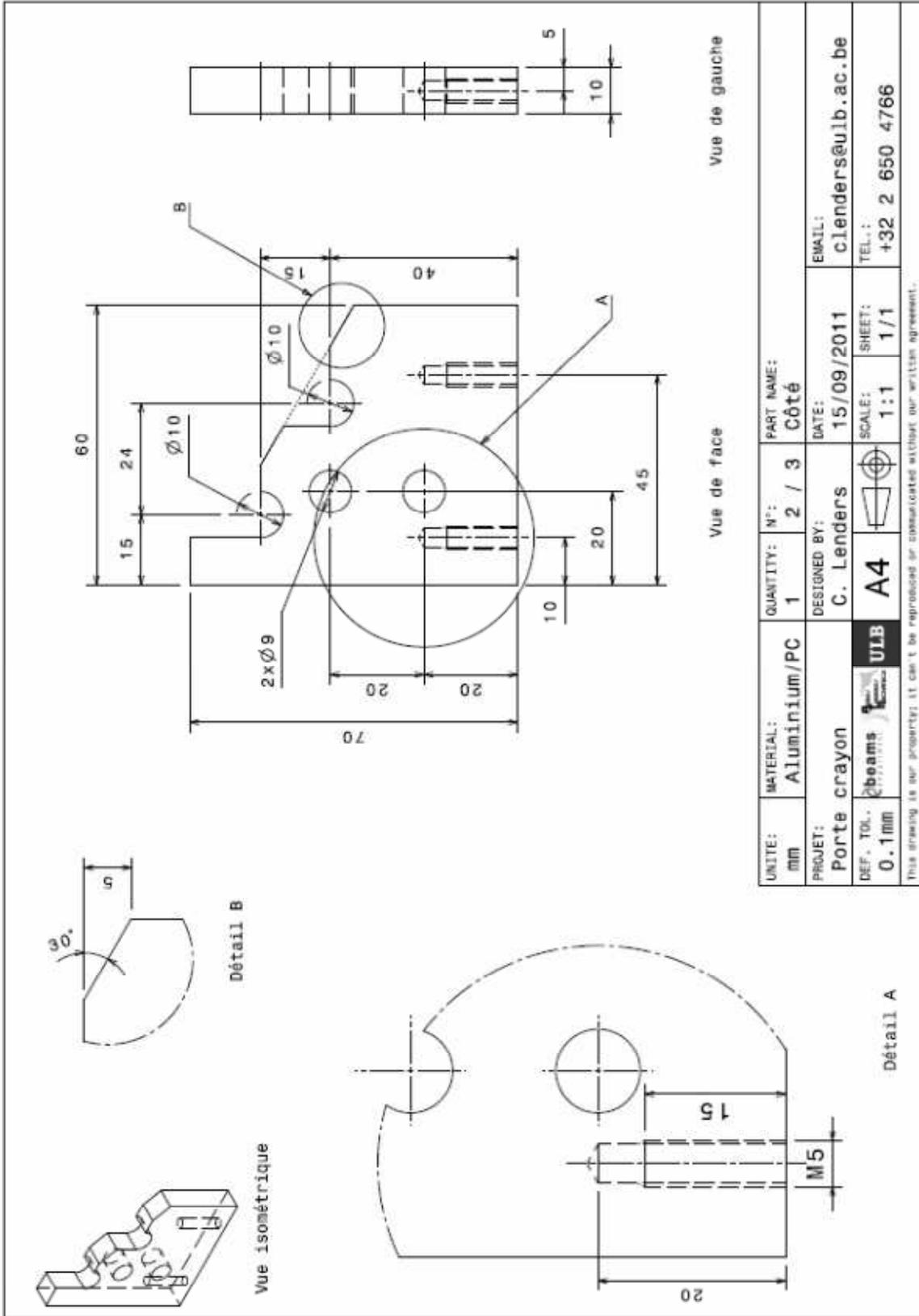
UNITE: mm	MATERIAL: Mixte	QUANTITY: 1	N°: X	PART NAME: Porte crayon
PROJET: Porte crayon	DESIGNED BY: C. Lenders	DATE: 15/09/2011	EMAIL: clenders@ulb.ac.be	
DEF. TOL. 0.1mm	Scale: 1:1	SHEET: 1/1	TEL.: +32 2 650 4766	

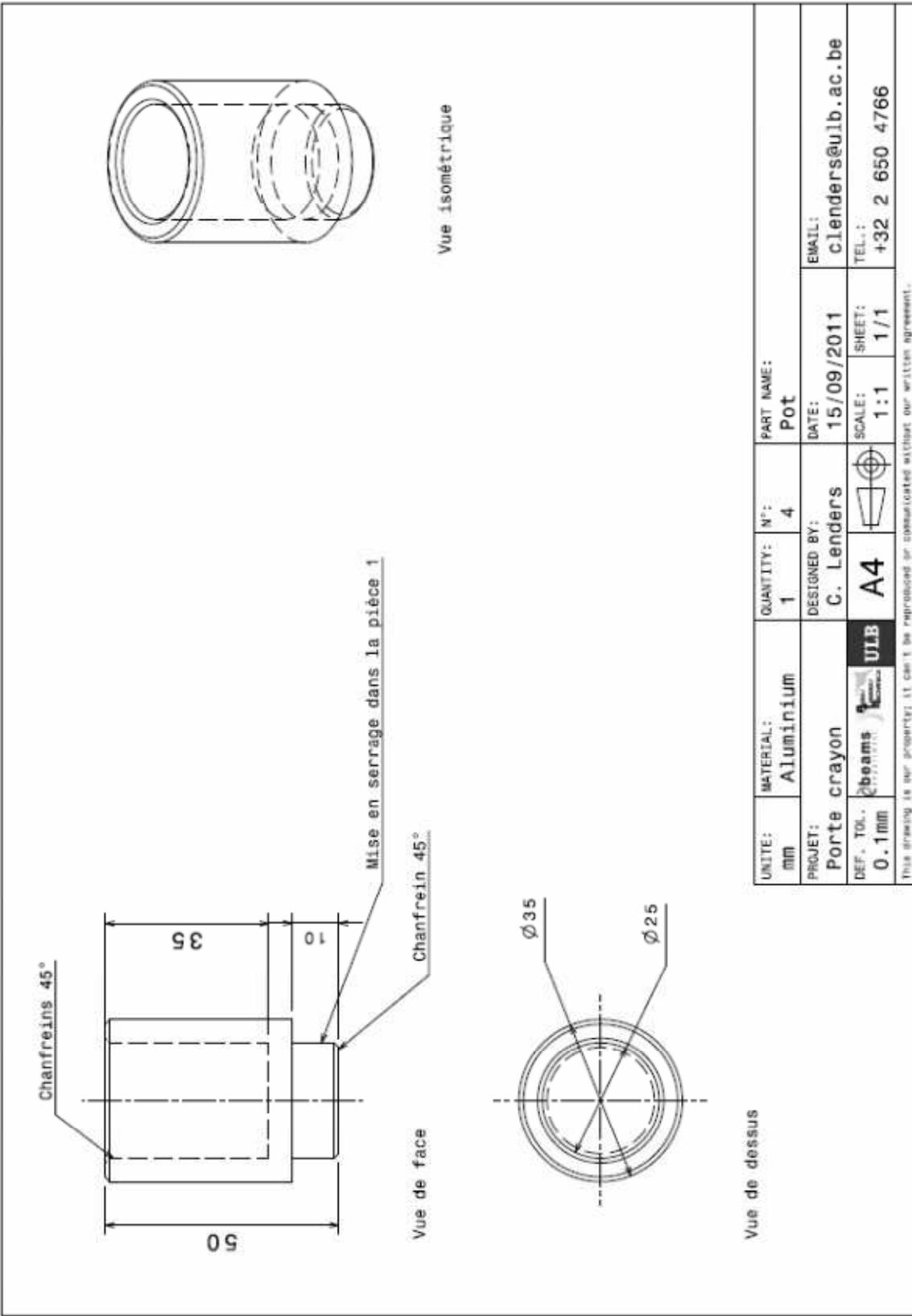
**U13**

**beams**

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

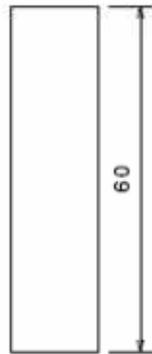




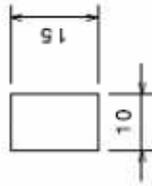


UNITE: mm	MATERIAL: Aluminium	QUANTITY: N°: 1	PART NAME: Pot
PROJET: Porte crayon	DESIGNED BY: C. Lenders	DATE: 15/09/2011	EMAIL: clenders@uib.ac.be
DEF. TOL. 0.1mm	SCALE: 1:1	SHEET: 1/1	TEL.: +32 2 650 4766

This drawing is our property; it can't be reproduced or disseminated without our written agreement.



Vue de face



Vue de gauche



Vue isométrique

UNITE: mm	MATERIAL: Acier	QUANTITY: N°: 2	5	PART NAME: Patte		
PROJET: Porte Crayon	DESIGNED BY: C. Lenders	DATE: 15/09/2011	EMAIL: clenders@uib.ac.be			
DEF. TOL. 0.1mm	 beams	A4	SCALE: 1:1	SHEET: 1/1	TEL.: +32 2 650 4766	
						
<small>This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.</small>						