

Résumé Semaine 4

Procédés de fabrication par usinage États de surface

Dr. S. Soubielle

S. Soubielle

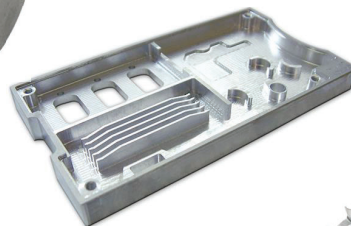
1

Résumé semaine 4

ME-105 – Introduction à la Conception Mécanique

Procédés de fabrication par usinage (1/2)

- **Principe et physique de la coupe**
 - Procédé de fabrication par enlèvement de matière → copeau
 - Outil de coupe extrêmement résistant (cermet ou ARS / HSS)
- **Types d'usinage et topologie de pièce**
 - **Tournage**
 - Pièces axisymétriques
 - **Fraisage 3-axes**
 - Pièces prismatiques « simples »
 - **Tournage + fraisage 3-axes
(avec reprise de pièce) et/ou fraisage 5-axes+**
 - Pièces à topologie plus complexe →→→→→→→→



Procédés de fabrication par usinage (2/2)

• Paramètres de coupe

- V_c dépend de l'outil utilisé et du matériau à usiner

→ Pièce : aluminium + rapide qu'acier/fonte

→ Outil : cermet + rapide qu'ARS / HSS

- $V_c, f_z, a_p \rightarrow$ Impact qualité des surfaces



• Types d'opération

- Terminologie spécifique en tournage et en fraisage
- Stries caractéristiques sur les surfaces usinées

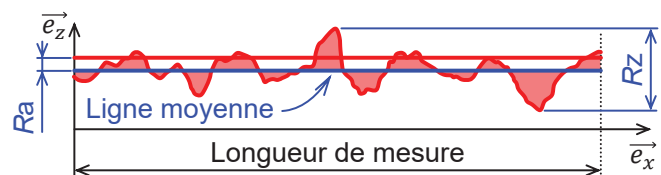
• ⚠ Limitations et design ⚠

- **Coin rentrant impossible à réaliser en usinage**
- Géométrie → Toujours privilégier le volume min. de copeau

États de surface

• Paramètres normalisés

- Rugosité arithmétique R_a
- Classe de rugosité ISO
- Hauteur maximale de profil R_z



• Outils de mesure

Rugosimètre (précis) ou rugotest (estimatif)



• Limitation due au procédé

- Usinage → N6 / $R_a 0,8$ au mieux
- Rectification → jusqu'à N3 / $R_a 0,1$

• Spécifications sur le plan

Exigence générale / locale $\sqrt{R_a 1,6}$ (∇ , $\nabla^{\text{rectifié}}$ $R_a 0,4$) ou $\sqrt{R_a 1,6}$ (\checkmark)

Notes personnelles

A large grid of graph paper for taking notes, consisting of 20 columns and 40 rows of small squares.

Notes personnelles

A large grid of graph paper, consisting of 20 columns and 40 rows of small squares, intended for taking personal notes.

Tolérancement dimensionnel I

Défaut dimensionnel,
Tolérance dimensionnelle,
Système de tolérances générales

Dr. S. Soubielle



Dans ce cours, nous allons...

... Introduire la notion de tolérance dimensionnelle

- ... Origine des défauts dimensionnels sur pièces réelles
- ... Concept de défaut maximum admissible
- ... Terminologie et notation des tolérances dimensionnelles

... Définir les tolérances dimensionnelles générales

- ... Principe, valeurs et notations sur le plan
- ... À quel besoin cela répond-il ?

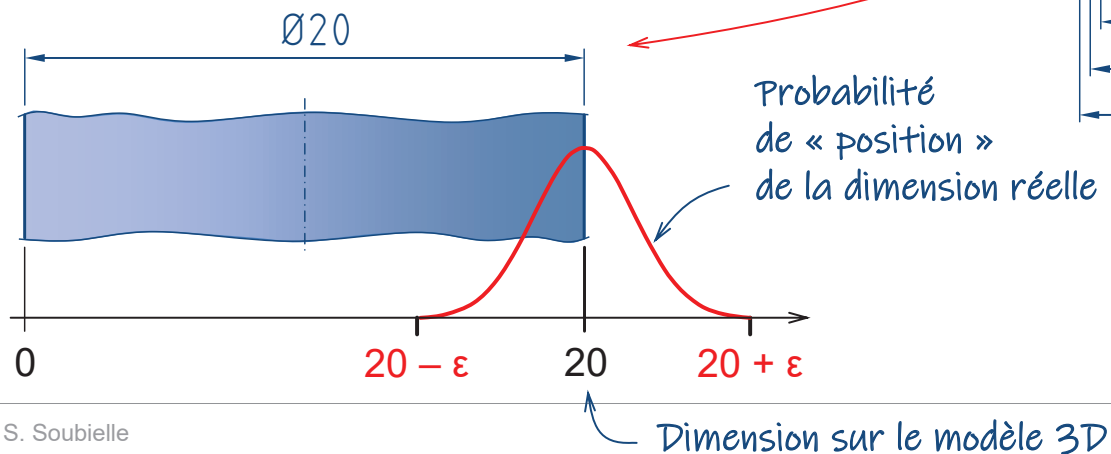
Pièce réelle vs. pièce parfaite (1/2)

- Cotation selon cours semaine 6**

- Cas idéal d'une pièce « parfaite »
- Dimensions issues du modèle 3D

- Fabrication de la pièce (« monde réel »)**

Impossible d'obtenir une pièce aux cotes parfaitement exactes !



S. Soubielle

3

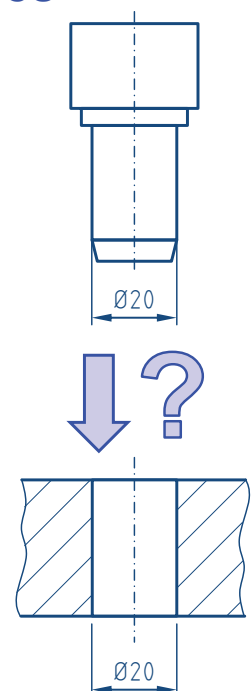
Pièce réelle vs. pièce parfaite (2/2)

- Système mécanique = assemblage de pièces**

- Comment s'assurer que les pièces réelles vont s'assembler malgré les défauts ?

- Phase de conception**

- Les pièces réelles n'existent pas
- L'ingénieur-constructeur doit « anticiper » les défauts des pièces pour garantir qu'elles s'assemblent dans 100 % des cas



S. Soubielle

4

Amplitude du défaut dimensionnel

• Distribution de la probabilité

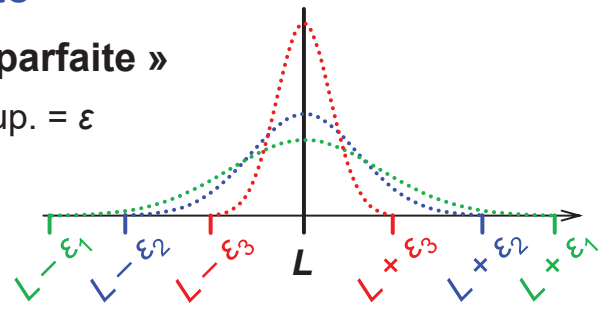
- **A priori centrée sur la cote « parfaite »**

→ Écart max. inf. = écart max. sup. = ε

→ Plage d'incertitude = $2 \times \varepsilon$

- **Incertain + ou – grande...**

→ Cote plus ou moins précise



• De quoi dépend la largeur de la plage d'incertitude ?

- **Précision intrinsèque du procédé de fabrication**

Par ex. sur machine d'usinage std : $\pm 50 \mu\text{m} / 100 \text{ mm}$ et $\pm 5'$ d'angle

- **Valeur de la cote « parfaite » (si linéaire)**

Par ex. : $\pm 0,1$ plus facile à obtenir sur une cote de 100 mm que 1 m

- **Autres** → Paramètres d'usinage et niveau d'usure des outils
→ Précision des outils de mesure / contrôle

Écarts limites et dimension admissible

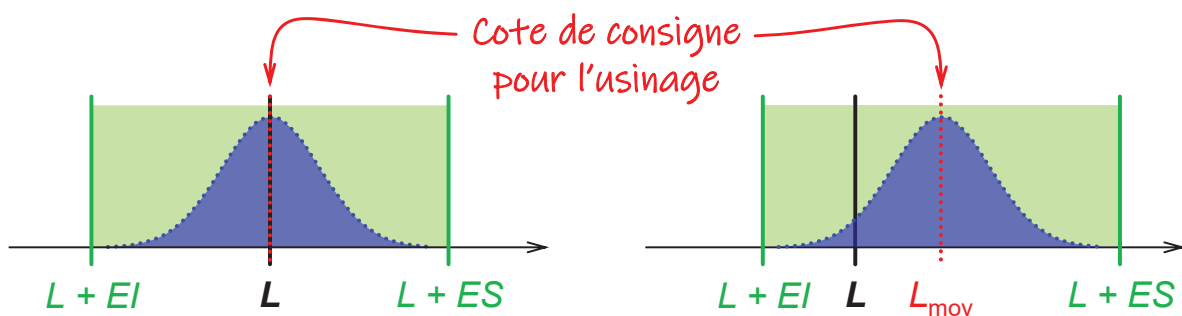
• Pour chaque cote, le concepteur veut spécifier...

- L'écart limite inférieur admissible EI → $L_{\min} = L + EI$

- L'écart limite supérieur admissible ES → $L_{\max} = L + ES$

→ **La cote réelle devra être comprise entre L_{\min} et L_{\max}**

- Si $EI = -ES$ → L'usineur va viser la cote parfaite L pour l'usinage
- Si $EI \neq -ES$ → L'usineur va viser la cote moyenne $(L_{\min} + L_{\max}) / 2$



Terminologie et notation (1/3)

- Dimension (taille) nominale**

Dimension de référence sur le plan
(= cas idéal)

- Ecart limite supérieur (ES) et écart limite inférieur (EI)**

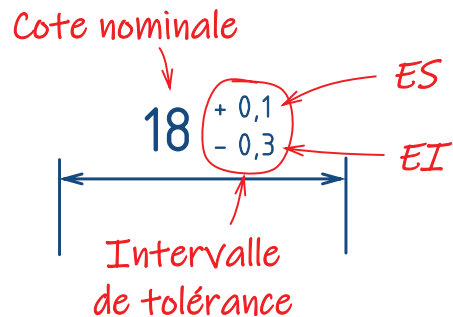
1^{ère} ligne = ES / 2^{ème} ligne = EI

- Dimensions limites admissibles**

- Limite supérieure adm. = dim. nominale + ES
- Limite inférieure adm. = dim. nominale + EI

- Intervalle de tolérance**

= Combinaison de ES et de EI



Terminologie et notation (2/3)

- Unité de ES et EI** → Identique à celle de la cote nominale

- « Positions » possible pour l'intervalle de tolérance**

– Quelconque ($|ES| \neq |EI|$) → $ES > 0$ et $EI < 0$ $18 \begin{smallmatrix} +0,1 \\ -0,3 \end{smallmatrix}$

→ $ES < 0$ $18 \begin{smallmatrix} -0,006 \\ -0,017 \end{smallmatrix}$

→ $EI > 0$ $18 \begin{smallmatrix} +0,15 \\ +0,12 \end{smallmatrix}$

– Centré sur la cote nominale ($|EI| = |ES|$) → $18 \pm 0,05$

– $ES = 0$ → $18 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0,030 \end{smallmatrix}$

– $EI = 0$ → $18 \begin{smallmatrix} +0,065 \\ 0 \end{smallmatrix}$

Terminologie et notation (3/3)

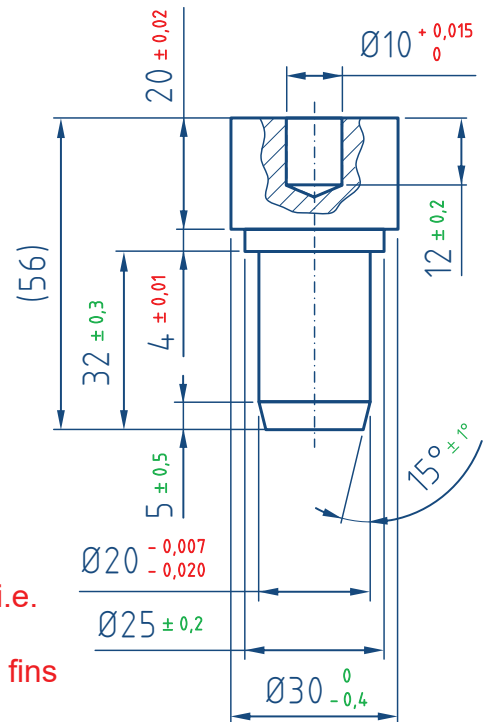
• Exemple de tolérancement dimensionnel d'un pièce

→ **Intervalle de tolérance explicite affecté à chaque cote**

- Surcharge le dessin et nuit à sa lisibilité
- Ne permet pas d'identifier rapidement les tolérances les plus exigeantes

→ **Tolérances exigeantes ou pas ?**

- **En vert** : tolérances peu exigeantes, i.e. pouvant être facilement satisfaites avec machine de précision standard et paramètres de coupe plus grossiers
- **En rouge** : tolérances les plus exigeantes, i.e. nécessitant l'utilisation d'une machine plus précise et/ou de paramètres de coupe plus fins



Tolérances générales ISO-2768 (1/2)

• Principe

Remplacer l'écriture explicite de l'intervalle de tolérances par une « classe de tolérance générale »

- Valable pour la pièce complète
- Destinée aux cotes pour lesquelles le niveau de précision requis est faible

• Classes de tolérances générales à choix

- | | |
|---|--------------|
| – Fine (« <i>fine</i> ») | → ISO 2768-f |
| – Moyennes (« <i>medium</i> ») | → ISO 2768-m |
| – Grossières (« <i>coarse</i> ») | → ISO 2768-c |
| – Très grossière (« <i>very coarse</i> ») | → ISO 2768-v |

Tolérances générales ISO-2768 (2/2)

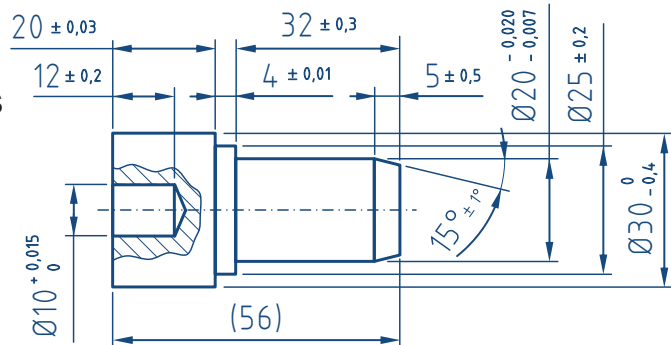
- **Intervalles de tolérances si dimension linéaire**

Classe de tolérance	Dimension nominale [mm]							
	≥ 0,5 ... 3	> 3 ... 6	> 6 ... 30	> 30 120	> 120 ... 400	> 400 ... 1000	> 1000 ... 2000	> 2000 ... 4000
	Écart [mm]							
f (fine)	± 0,05	± 0,05	± 0,1	± 0,15	± 0,2	± 0,3	± 0,5	–
m (moyenne)	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2
c (grossière)	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2	± 3	± 4
v (très grossière)	–	± 0,5	± 1	± 1,5	± 2,5	± 4	± 6	± 8



Exercice d'application

Le plan spécifie les tolérances générales selon ISO 2768-m. Supprimer les intervalles de tolérances redondants.



Notes personnelles

Systemes mécaniques

Assemblage mécanique,
Fonctions de service,
Fonctions techniques

Dr. S. Soubielle



Dans ce cours, nous allons...

... Définir ce qu'est un système mécanique

- ... Et les documents nécessaires pour le construire
(plan d'ensemble, nomenclature, et procédure de montage)

... Définir ce que sont les fonctions de service d'un système mécanique

- ... À quel(s) besoin(s) répond le système mécanique ?
- ... Quelles fonctions secondaires doivent être satisfaites ?

... Définir ce que sont les fonctions techniques

- ... Découlant des fonctions de services
- ... Qui vont se traduire par des conditions de fonctionnement à respecter

Système mécanique

• C'est quoi un système mécanique ?

- Ensemble de pièces mécaniques liées entre elles...
- ... Par des procédés démontables (p.ex. vissage) ou indémontables (p.ex. soudage)...
- ... En vue de satisfaire une ou plusieurs fonctions de service.



Moteur à explosion Cox .049 Babe Bee ®

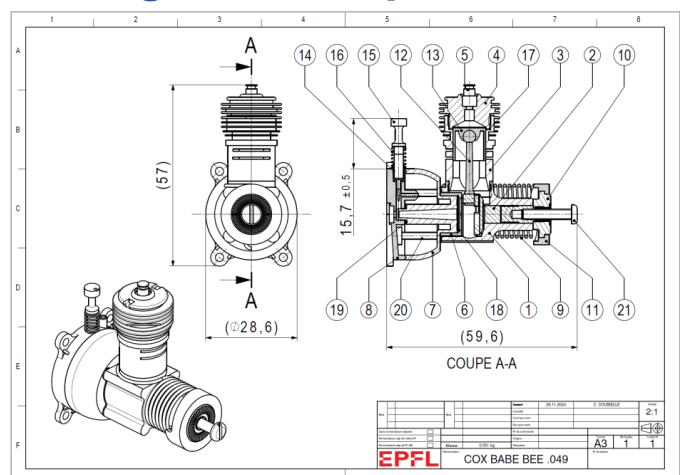
• De quoi a-t-on besoin pour le construire ?

- L'intégralité des pièces constitutive de l'assemblage, y compris visserie, graisse, colle, etc.
- Les outils de montage (clés de serrage, etc.)
- Les informations relatives à l'assemblage

Plan d'ensemble

• Représentation de l'assemblage mécanique

- En situation assemblée et/ou « éclatée »
- Vues extérieures et/ou en coupe
- Projections orthogonales et/ou axonométriques



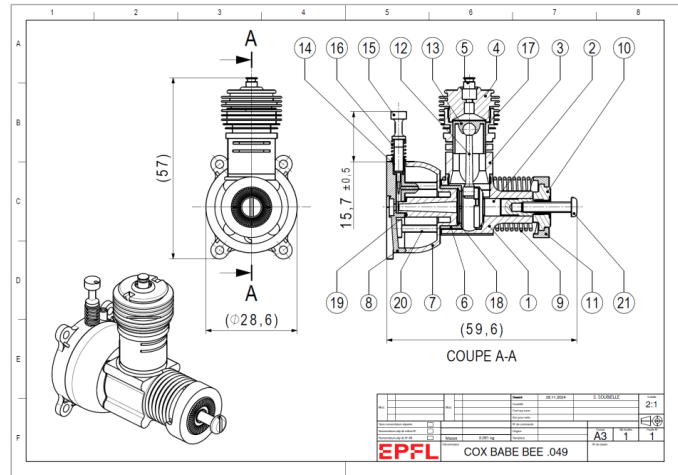
• Infos complémentaires

- Numérotation des pièces
- Cotes d'encombrement (entre parenthèses) : L × H × P
- Masse de l'ensemble
- Cotes effectives de montage et/ou de réglage, le cas échéant

Plan d'ensemble

• Représentation de l'assemblage mécanique

- En situation assemblée et/ou « éclatée »
- Vues extérieures et/ou en coupe
- Projections orthogonales et/ou axonométriques



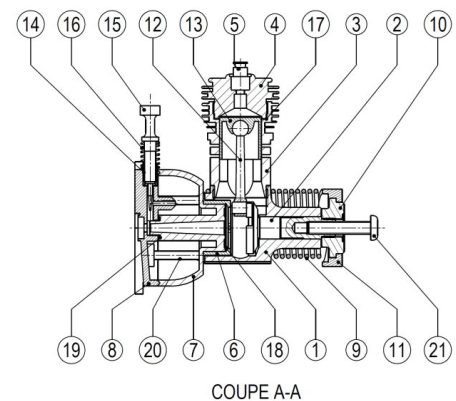
• Infos complémentaires

- Numérotation des pièces
- Cotes d'encombrement (entre parenthèses) : L × H × P
- Masse de l'ensemble
- Cotes effectives de montage et/ou de réglage, le cas échéant

Vue en coupe ou vue éclatée ?

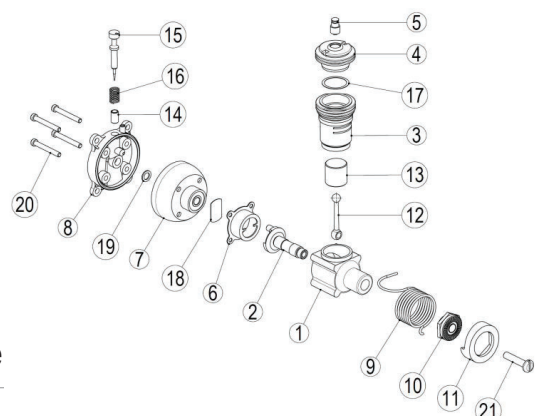
• Vue d'ensemble en coupe

- Permet de visualiser le système mécanique en configuration assemblée
- Un motif de hachures différent pour chaque pièce
- Si pièce de révolution « pleine » dont l'axe passe par le plan de coupe
→ non coupée dans la vue



• Vue d'ensemble éclatée

- Permet de visualiser distinctement les pièces constituant l'assemblage
- Utilisé en complément des vues en projection orthogonale



Nomenclature

• C'est quoi ?

Liste de toutes les pièces constitutives de l'assemblage

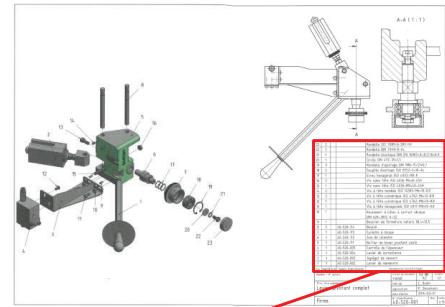
• Données contenues

- Position de la pièce (= N° sur le plan d'ens.)
- Numéro d'identification (= numéro d'article)
- Dénomination / désignation
- Quantité (pour chaque référence d'article)

• À quoi sert la nomenclature ?

→ Logistique et gestion des stocks

Extrait de Normes 2022, pp. 558-559



23	2		Rondelle ISO 7089-6-200 HV
22	1		Rondelle DIN 7349-8-Ac
21	1		Rondelle élastique DIN EN 16983-A-8,2/16x0,9
20	1		Circlip DIN 472-35x1,5
19	3		Rondelle d'ajustage DIN 988-15/21x0,1
18	2		Goupille élastique ISO 8752-5x10-Ac
17	1		Ecrou hexagonal ISO 4032-M8-8
16	2		Vis sans tête ISO 4026-M6x8-45H
15	1		Vis sans tête ISO 4026-M8x40-45H
14	2		Vis à tête bombée ISO 14583-M6x10-8.8
13	2		Vis à tête cylindrique ISO 4762-M6x12-8.8
12	1		Vis à tête cylindrique ISO 4762-M8x20-8.8
11	1		Vis à tête hexagonale ISO 4017-M8x16-8.8
10	1		Roulement à billes à contact oblique DIN 628-3002 A-2Z
9	1		Bouchon de fermeture nature 38,4x12,5
8	2	40-520-114	Boulon
7	1	40-520-113	Cylindre à disque
6	1	40-520-112	Axe de calandre
5	1	40-520-111	Boîtier de levier pivotant usiné
4	1	40-520-005	Contrôle de l'épaisseur
3	1	40-520-004	Levier de surveillance
2	1	40-520-003	Agrégat de ressort
1	1	40-520-002	Levier de manœuvre

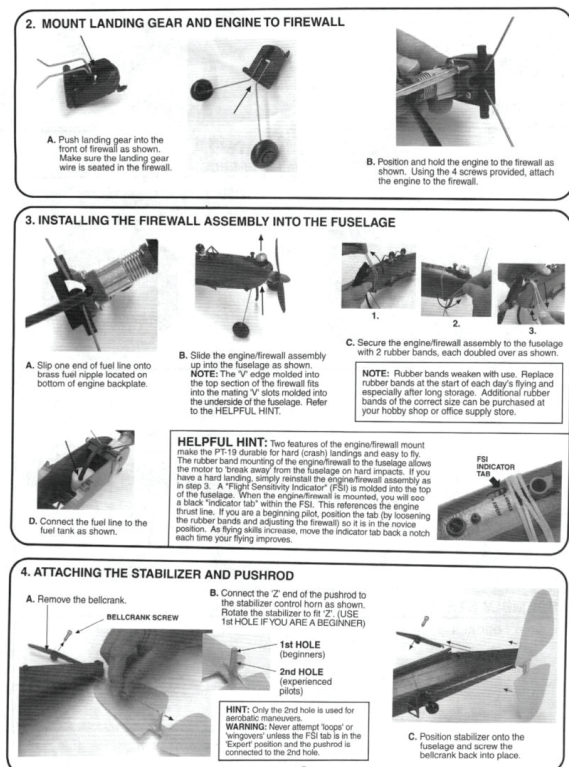
S. Soubielle

7

Procédure de montage

• Pour quoi faire ?

- Document illustré
- Décrit les étapes successives de montage
- Détaille les pièces (et éventuellement les outils) nécessaires à chaque étape
- Document optionnel, mais recommandé pour les montages complexes et/ou destinés à être assemblés par du personnel peu qualifié



Extrait du manuel d'assemblage
COX PT-19 / COX 5700 ®

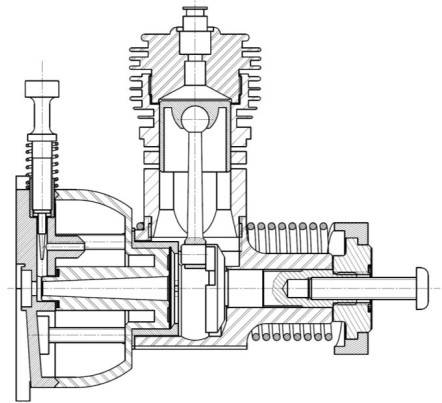
S. Soubielle

8

Fonctions de Service (1/2)

- **Fonctions principales (FP)**

= Fonctions pour lesquelles le système mécanique est conçu



- **Fonctions contraintes (FC)**

= Fonctions rendues nécessaires à l'obtention de la FP

Fonctions de Service (2/2)

- **Formulation d'une Fonction de service (FS)**

- **Qualifier, par du texte**

- Un verbe d'action

« *transmettre, entraîner, convoier, guider, fournir, retenir, maintenir, isoler, évacuer, exercer, collecter, assurer, etc.* »

- Un (ou des) complément(s)

« *le mouvement, la force, la poussée, le couple, la position, la pression, la chaleur, l'étanchéité, en translation, en rotation, etc.* »

- **Quantifier, par des chiffres**

Valeurs minimale, nominale, maximale, moyenne... de vitesse, force, couple, pression, température, distance, position, angle, etc.

- **Fonctions Techniques (FT) d'un système mécanique**

- Fonctions internes définies au niveau d'un ensemble de pièces
 - Se traduisent par des conditions de fonctionnement (CF)

FT – Exemple du micro-moteur (1/5)

• Étape 0 – Identification des sous-ensembles mobiles

– Bloc-moteur

→ Ensemble des pièces statiques qui jouent le rôle de châssis. Inclut le cylindre dans lequel a lieu la combustion

– Piston

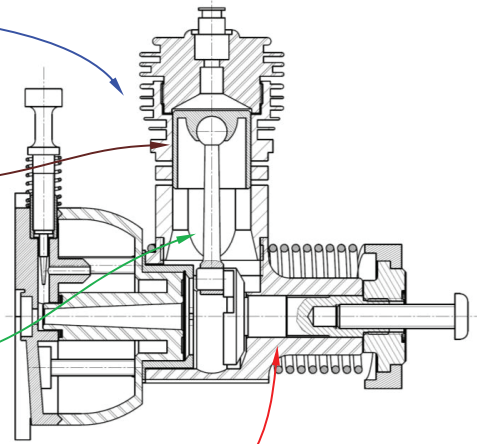
→ Pièce de révolution qui reçoit la force de pression due à la combustion et qui coulisse dans l'axe du cylindre

– Bielle

→ Tige qui relie le piston à l'arbre de sortie, et qui transmet la puissance mécanique

– Arbre de sortie

→ Pièce de révolution qui tourne autour d'un axe fixe (par rapport au bloc-moteur) et qui transmet la puissance mécanique à l'hélice



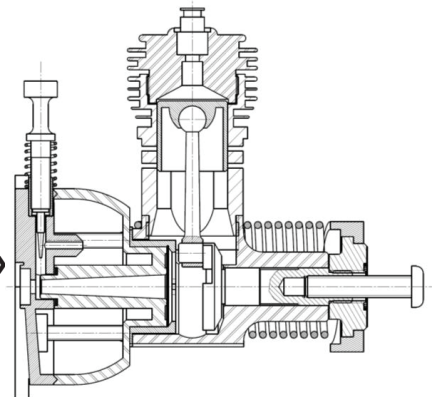
FT – Exemple du micro-moteur (2/5)

• Étape 1 : Fonctions techniques des sous-ensembles

FC1 : « Résister à la chaleur [...] »

FC2 : « Réduire les pertes d'énergie [...] »

FC3 : « Être le plus léger possible »

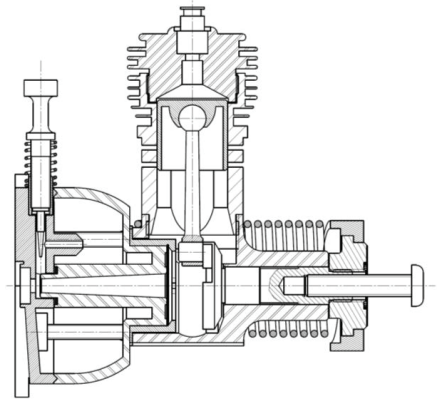


FT – Exemple du micro-moteur (3/5)

• Étape 2 : FT et conditions fonctionnelles (1)

FT1.1 = « [...] résister à 600 °C dans la zone de combustion »

FT1.2 = « [...] favoriser l'évacuation de la chaleur »



FT3.2 = « [...] masse volumique la plus faible possible »

FT – Exemple du micro-moteur (4/5)

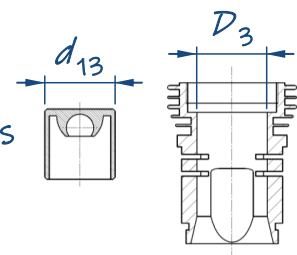
• Étape 2 : FT et conditions fonctionnelles (2)

FT2.1 = « Mouvement sans blocage »

→ Pas d'« interférence de matière » entre pièces mobiles

Par exemple : interface piston (13) / cylindre (3)

→ CF2.1 : Il faut $d_{13} < D_3$



FT2.2 = « [...] chambre de combustion hermétique [...] »

→ Absence de fuite entre le piston (13) et le cylindre (3)

→ CF2.4.1 : $D_3 - d_{13}$ doit être le + petit possible

FT2.3 = « Minimiser les frottements »

→ CF2.3 : Ra 0,8 / Rz 2,5 au max. (sur les surfaces concernées)

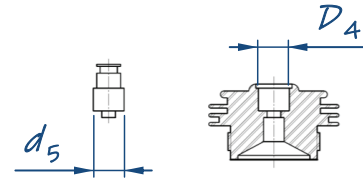
FT – Exemple du micro-moteur (5/5)

- **Étape 2 : FT et conditions fonctionnelles (3)**

FT2.2 = « [...] chambre de combustion hermétique [...] »

Par exemple : interface bougie (5) / culasse (4) :

Bougie « chassée » (= assemblée sous pression)
dans la culasse



→ La bougie ne doit pas être éjectée lors du fonctionnement du moteur (chambre de combustion sous pression)

→ Il faut $d_5 > D_4$

Notes personnelles

Tolérancement dimensionnel II

Ajustements Chanfreins et congés par défaut

Dr. S. Soubielle



Dans ce cours, nous allons...

... Définir la notion d'ajustement d'assemblage

- ... Concept de jeu et de serrage
- ... Tolérances de fabrication et types d'ajustement
- ... Calcul des jeux minimum et maximum d'assemblage

... Définir le chanfrein et le congé par défaut

- ... À quoi servent-ils ?
- ... Comment les spécifier sur le plan ?
- ... Quelles tailles choisir ?

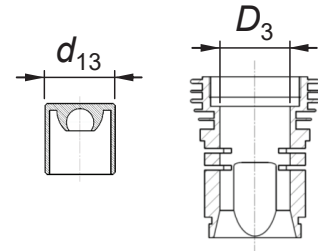
Retour sur le cours précédent

• Conditions de fonctionnement pour le micro-moteur

– Interface piston (13) / cylindre (3)

$$\rightarrow 5 < D_3 - d_{13} < 20 \mu\text{m}$$

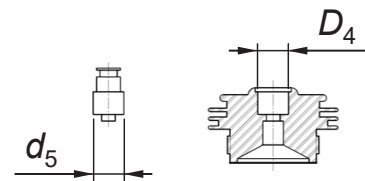
→ Guidage libre mais étanche



– Interface bougie (5) / culasse (4)

$$\rightarrow 5 < d_5 - D_4 < 15 \mu\text{m}$$

→ Assemblé sous pression



Ajustement d'assemblage

• Définition du jeu d'assemblage J

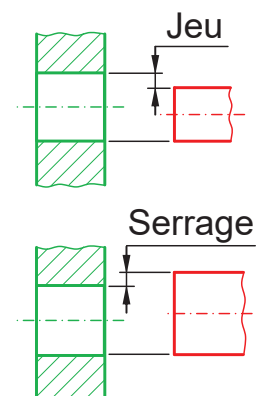
$$J = D - d$$

avec D : dim. intérieure (p. ex. \varnothing de l'alésage)

d : dim. extérieure (p. ex. \varnothing de l'arbre)

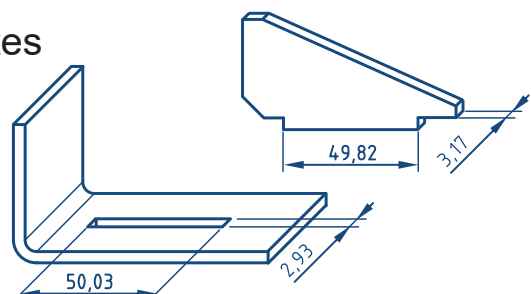
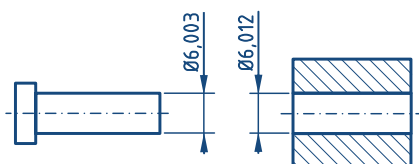
→ Ajustement « avec jeu » (ou « glissant ») si $J > 0$

→ Ajustement « avec serrage » (ou « serré ») si $J < 0$



Ajustement avec jeu ou serré ?

(Cotes indiquées = dimensions exactes mesurées sur les pièces réelles)



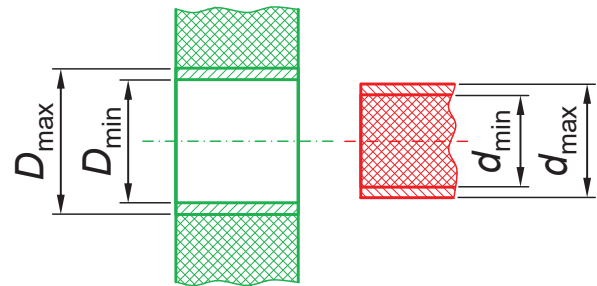
Tolérances et ajustement (1/4)

• Conception de produit et jeu d'assemblage

- **Plans de fabrication → Intervalles de tolérances (ES ; EI)**
→ Impossible de prédire la valeur exacte de J
- **Processus industriel d'assemblage**
 - La machine doit fonctionner dans 100 % des cas
 - Rôle du concepteur = choisir les intervalles de tolérances (ES ; EI) qui garantissent les fonctions techniques

• Définition de J_{\max} et J_{\min}

- $J_{\max} = D_{\max} - d_{\min}$
= Situation au « mini. matière »
- $J_{\min} = D_{\min} - d_{\max}$
= Situation au « maxi. matière »



Tolérances et ajustement (2/4)

• Trois types d'ajustement possibles

1. Ajustement avec jeu

Si J est toujours > 0 ,

→ Si $D_{\min} > d_{\max}$

2. Ajustement serré

Si J est toujours < 0 ,

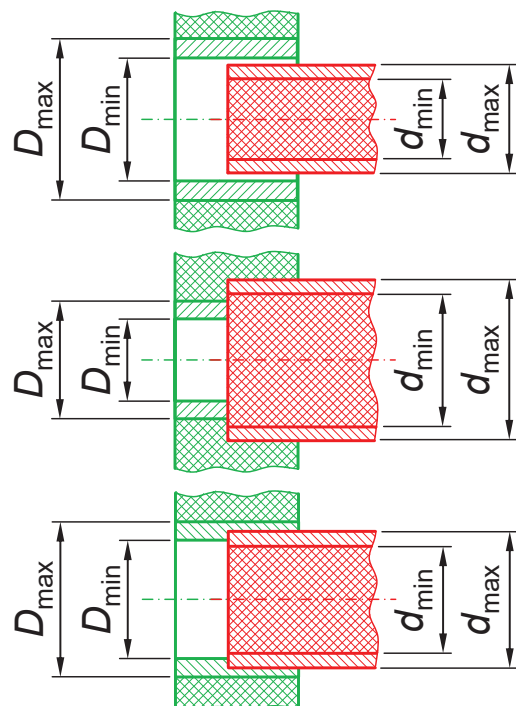
→ Si $D_{\max} < d_{\min}$

3. Ajustement incertain

Si J peut être ou > 0 ou < 0

→ Si $D_{\min} < d_{\max}$

Et $D_{\max} > d_{\min}$



Tolérances et ajustement (3/4)

• Calcul de J_{\max} et J_{\min}

– **Plans de fabrication** → D_{EI}^{ES} pour la dimension extérieure

→ d_{ei}^{es} pour la dimension intérieure

– **Cas général**

$$\rightarrow J_{\max} = D_{\max} - d_{\min} = (D_{EI}^{ES})_{\max} - (d_{ei}^{es})_{\min} = (D + ES) - (d + ei)$$

$$\rightarrow J_{\min} = D_{\min} - d_{\max} = (D_{EI}^{ES})_{\min} - (d_{ei}^{es})_{\max} = (D + EI) - (d + es)$$

– **Si $D = d$ (valeur nominale)**

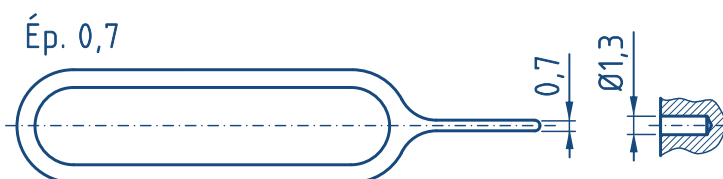
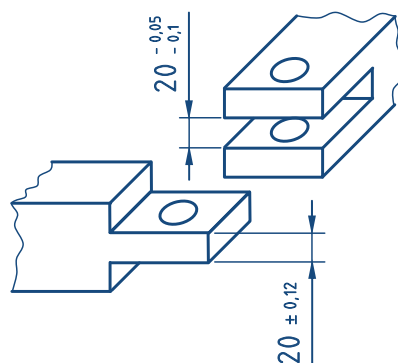
$$\rightarrow J_{\max} = ES - ei$$

$$\rightarrow J_{\min} = EI - es$$

Tolérances et ajustement (4/4)



Exercice d'application : quel type d'ajustement ?



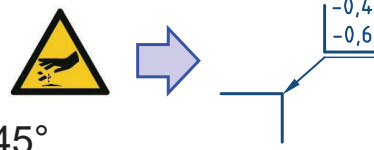
Tolérance générale : ISO 2768-m
(sur les deux pièces)

Chanfreins et congés par défaut

• Chanfrein par défaut

Arêtes vives (90°) sont coupantes

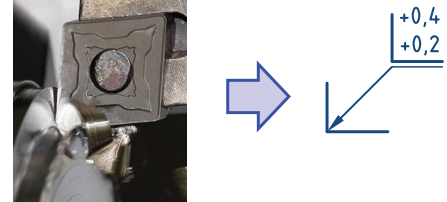
→ Systématiquement chanfreinées à 45°
(chanfrein « par défaut », $L < 1 \text{ mm}$)



• Congé par défaut

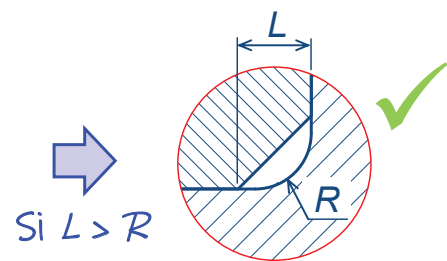
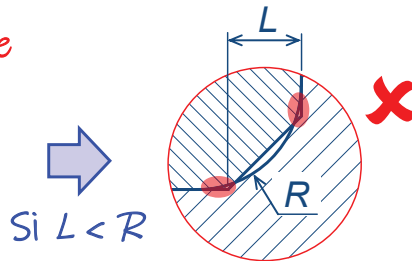
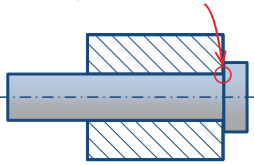
Rayon d'outil en usinage ($0,2 < R < 0,8$)

→ Rayon de congé sur arêtes rentrantes



• Règle de non-interférence

Inspectons cette zone



Notes personnelles

Notes personnelles

A large grid of graph paper for personal notes, consisting of 20 columns and 40 rows of small squares.