

Assemblages arbre-moyeu

Prof. Éric Béchet

Assemblages arbre-moyeu

- Intro
- Éléments de conception
 - Clavettes
 - Frettage
 - (Cannelures)
- Exercices d'application

Assemblages arbre-moyeu

■ Intro

- Les éléments de machine sont fréquemment rapportés sur l'arbre
 - Poulies, roues dentées ...
 - Roulements, paliers
 - Joints élastiques, homocinétiques (ou de Cardan),
 - Tout autre élément fonctionnel !
 - On envisage aussi le raccord de deux arbres entre eux.
- Il existe deux fonctions à assurer
 - Transmettre un couple
 - Positionner/centrer

Ces deux fonctions sont parfois assurées simultanément !

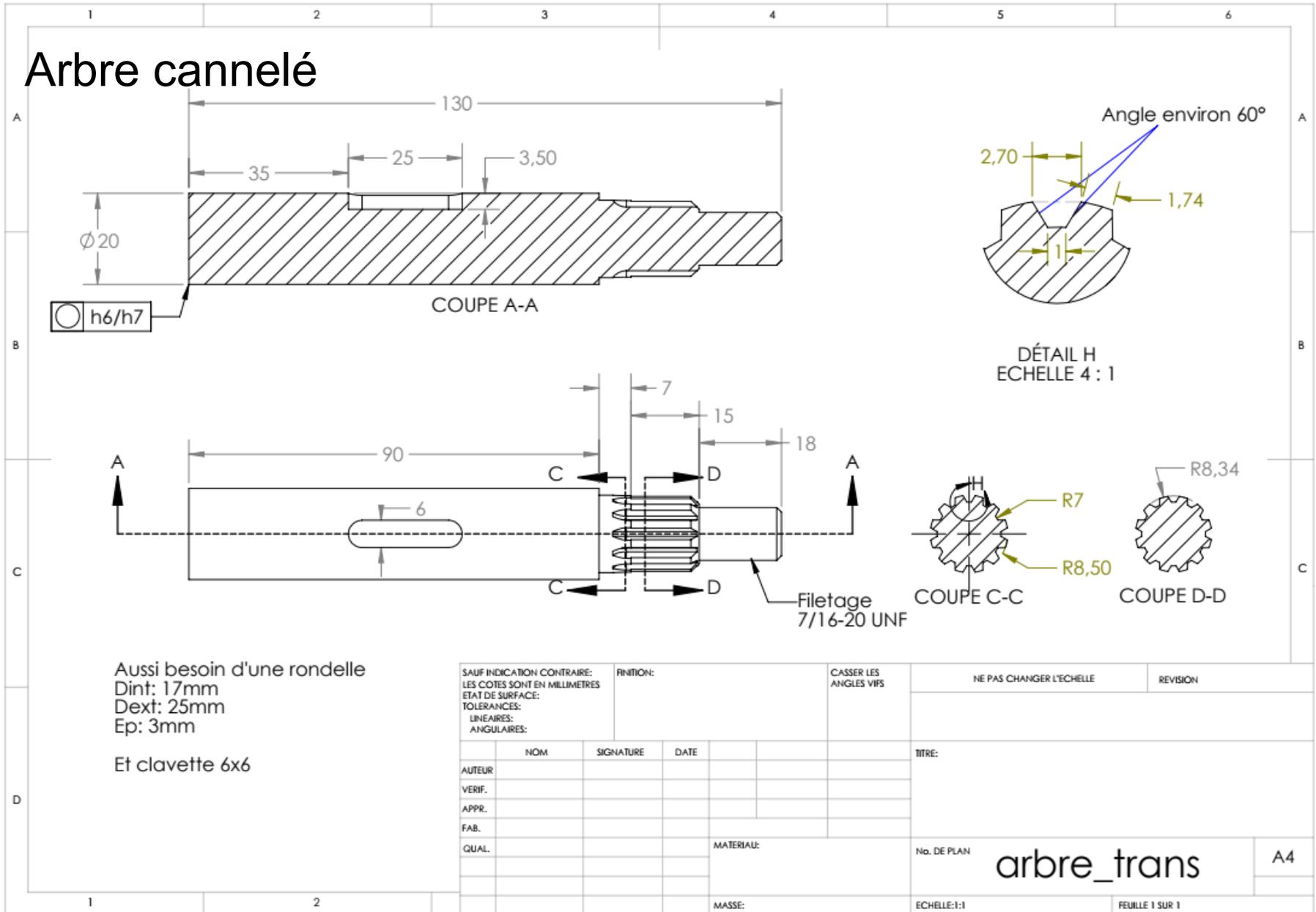
Assemblages arbre-moyeu

- Types et conditions d'assemblage

Principe Couple → ↓	Obstacle permettant la mobilité axiale	Obstacle bloquant la mobilité axiale	Obstacle précontraint	Par adhérence
Faible	-Clavette parallèle	-Clavette disque -Goupille	-Clavette vélo -Clavette disque sur rainure moyeu inclinée	-Clavette chassée -pinçage
Moyen	-Clavette parallèle (couple unidir.)		-Clavette chassée	-Cône serré -Emmanchement à la presse
Grand	-Arbre cannelé		-Arbre cannelé serré	-Emmanchement par frettage -Anneaux élast.

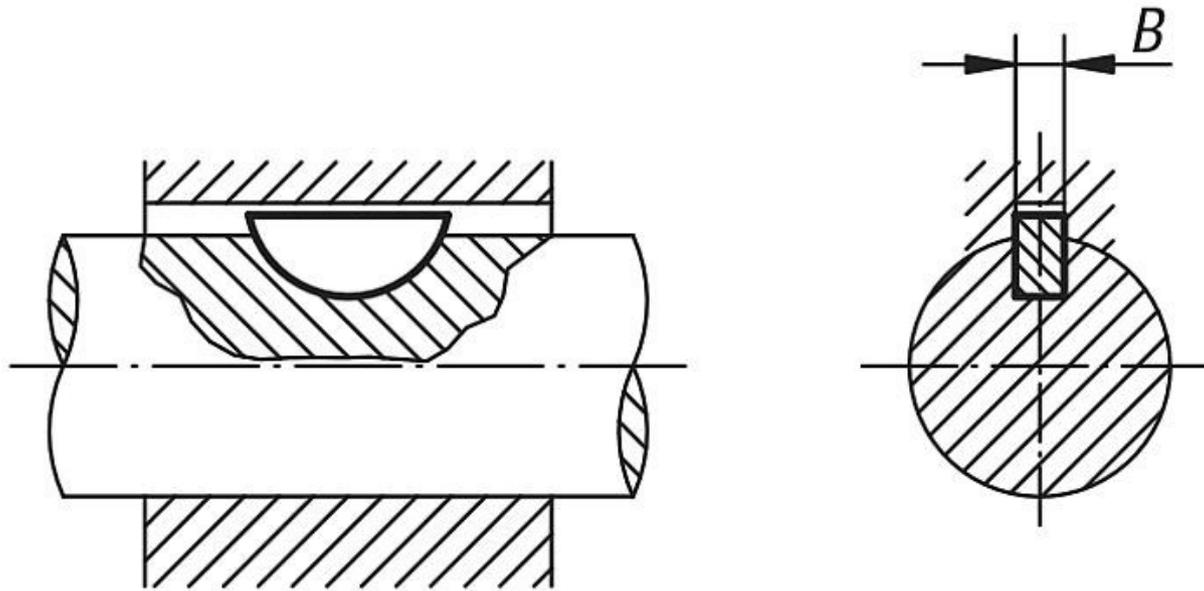
Assemblages arbre-moyeu

■ Arbre cannelé



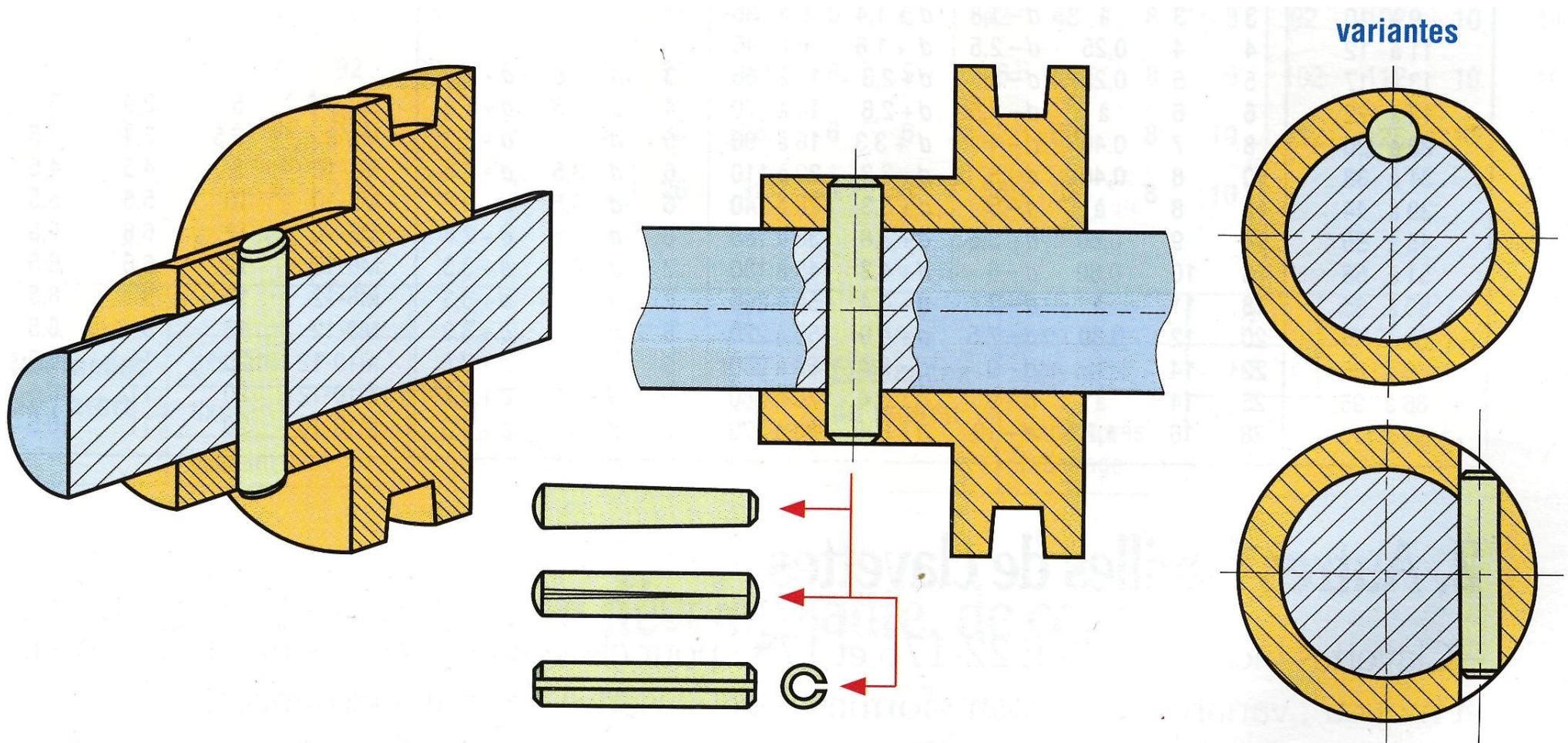
Assemblages arbre-moyeu

- Clavette disque



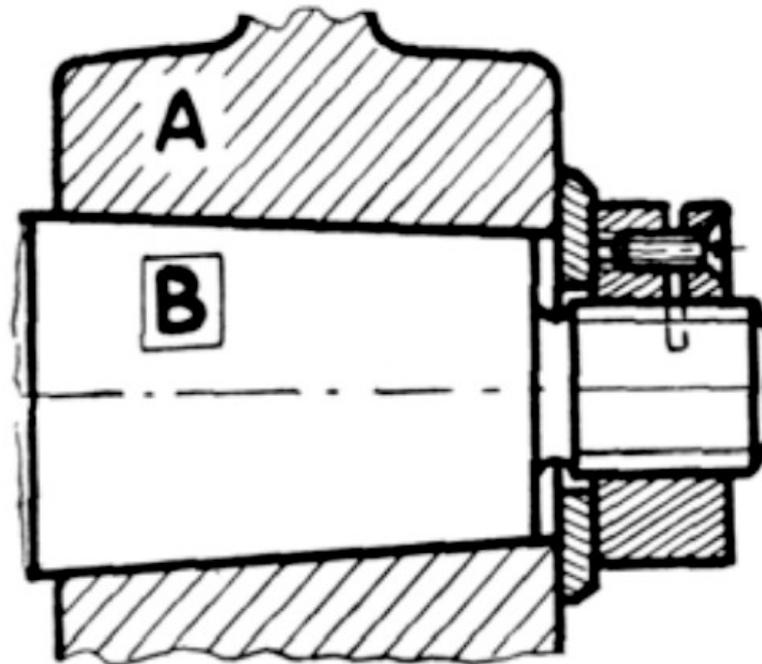
Assemblages arbre-moyeu

- Goupille / clavette vélo



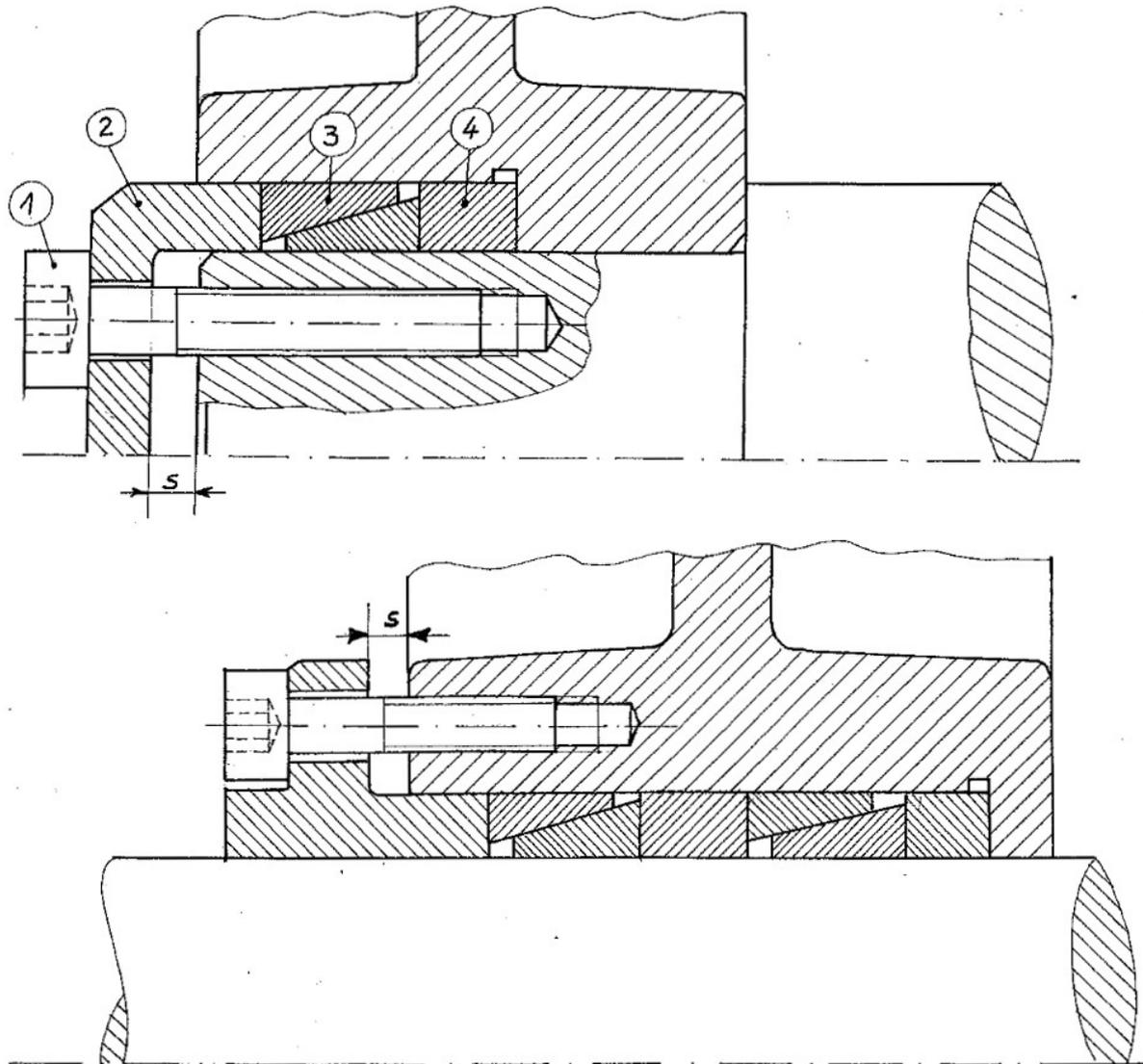
Assemblages arbre-moyeu

- Cône serré (dimensionnement similaire au frettage)



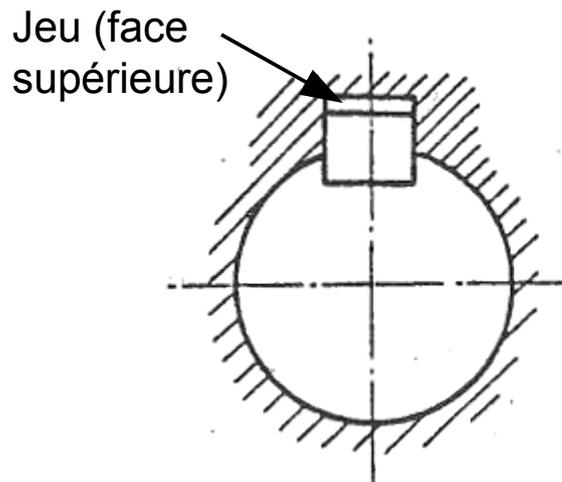
Assemblages arbre-moyeu

- Anneaux élastiques

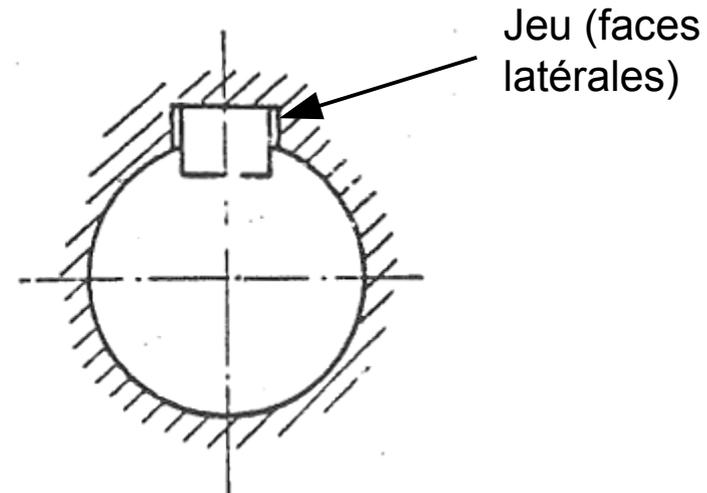


Assemblages arbre-moyeu

- Clavettes longitudinales (cales)
 - Permet un blocage en rotation entre un arbre et un élément rapporté (e.g. roue dentée)
 - N'assure pas le positionnement (centrage) !
 - Deux types de clavettes :



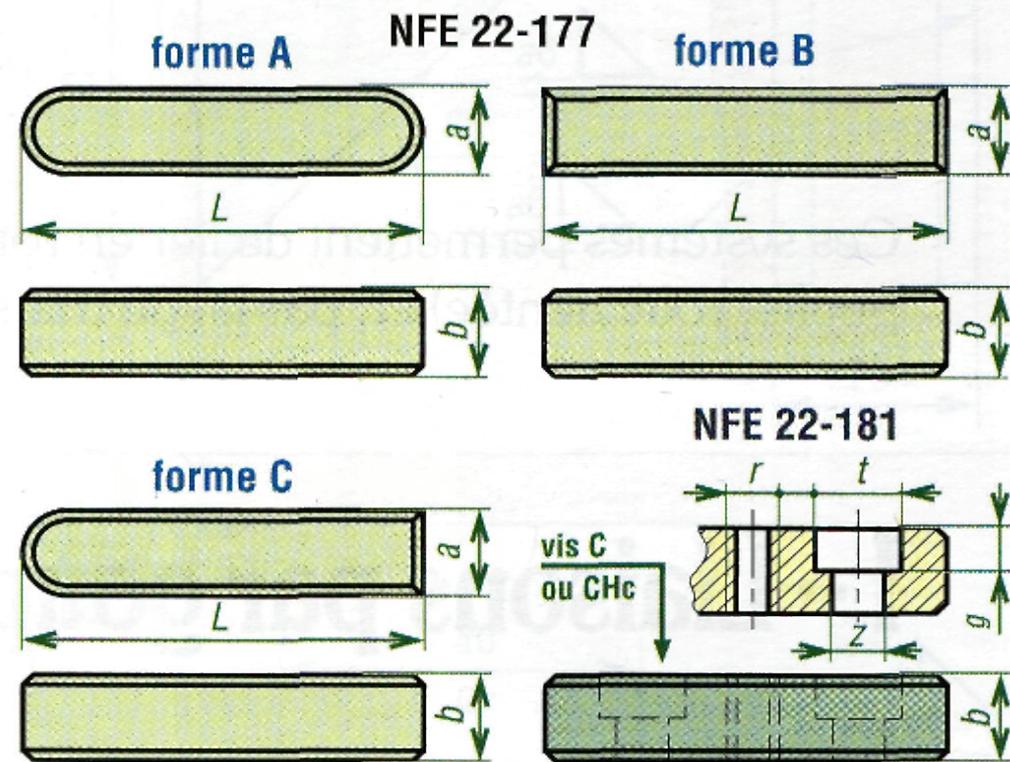
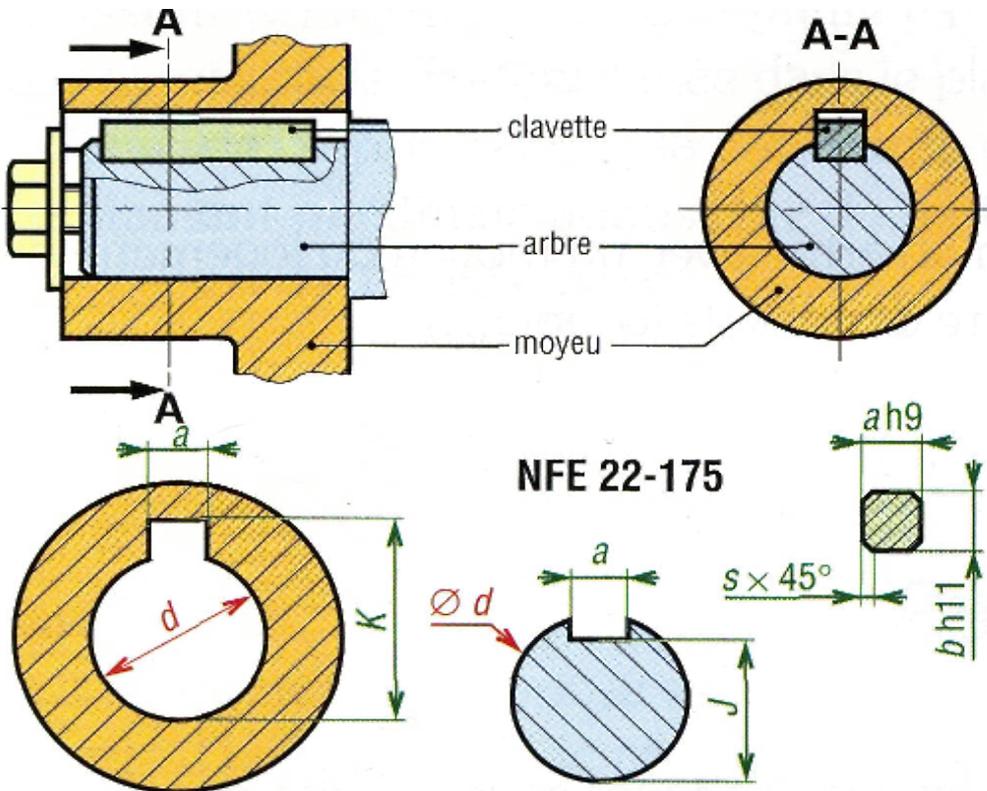
Clavette dormante
à faces parallèles



Clavette chassée
à faces inclinées

Assemblages arbre-moyeu

- Dimensions normalisées des clavettes parallèles NF E-22-177, rainures NF E-22-175



Assemblages arbre-moyeu

- La section est imposée, mais pas la longueur L !

Clavettes parallèles : principales dimensions normalisées														
d de – à (inclus)	série normale						série mince			cas d'une fixation par vis				
	a	b	s	J	K	L	b^*	J^*	K^*	vis	t	z	g	r
6 à 8	2	2	0,16	$d-1,2$	$d+1$	6 à 20								
9 à 10	3	3	à	$d-1,8$	$d+1,4$	6 à 36								
11 à 12	4	4	0,25	$d-2,5$	$d+1,8$	8 à 45								
13 à 17	5	5	0,25	$d-3$	$d+2,3$	10 à 56	3	$d-1,8$	$d+1,4$					
18 à 22	6	6	à	$d-3,5$	$d+2,8$	14 à 70	4	$d-2,5$	$d+1,8$	M2,5-6	5	2,9	3	2,5
23 à 30	8	7	0,40	$d-4$	$d+3,3$	18 à 90	5	$d-3$	$d+2,3$	M3-8	6,5	3,4	3,5	3
31 à 38	10	8	0,40	$d-5$	$d+3,3$	22 à 110	6	$d-3,5$	$d+2,8$	M4-10	8	4,5	4,5	4
39 à 44	12	8	à	$d-5$	$d+3,3$	28 à 140	6	$d-3,5$	$d+2,8$	M5-10	10	5,5	5,5	5
45 à 50	14	9	0,60	$d-5,5$	$d+3,8$	36 à 160	6	$d-3,5$	$d+2,8$	M6-10	12	6,6	6,5	6
51 à 58	16	10	0,60	$d-6$	$d+4,3$	45 à 180	7	$d-4$	$d+3,3$	M6-10	12	6,6	6,5	6
59 à 65	18	11	à	$d-7$	$d+4,4$	50 à 200	7	$d-4$	$d+3,3$	M8-12	16	9	8,5	8
66 à 75	20	12	0,80	$d-7,5$	$d+4,9$	56 à 220	8	$d-5$	$d+3,3$	M8-12	16	9	8,5	8
76 à 85	22	14	1	$d-9$	$d+5,4$	63 à 250	9	$d-5,5$	$d+3,8$	M10-12	20	11	10,5	10
86 à 95	25	14	à	$d-9$	$d+5,4$	70 à 280	9	$d-5,5$	$d+3,8$	M10-12	20	11	10,5	10
96 à 110	28	16	1,2	$d-10$	$d+6,4$	80 à 320	10	$d-6$	$d+4,3$	M10-16	20	11	10,5	10
111 à 130	32	18	1,5	$d-11$	$d+7,4$									
131 à 150	36	20	à	$d-12$	$d+8,4$									
151 à 170	40	22	2	$d-13$	$d+9,4$									
171 à 200	45	25	2	$d-15$	$d+10,4$									
201 à 230	50	28	à	$d-17$	$d+11,4$									
231 à 260	56	32	3	$d-20$	$d+12,4$									
261 à 290	63	32	3	$d-20$	$d+12,4$									
291 à 330	70	36	à	$d-22$	$d+14,4$									
331 à 380	80	40	4	$d-25$	$d+15,4$									
381 à 440	90	45	4	$d-28$	$d+17,4$									
441 à 500	100	50	4	$d-31$	$d+19,5$									

Assemblages arbre-moyeu

- La norme impose également les ajustements (serrés ou libres) :

Tolérances	Type de clavetage		
	Libre	Normal	Serré
a_{arbre}	H9	N9	P9
a_{moyeu}	D10	JS9	P9
a_{clavette}	h9	h9	h9
Tolérances (μm)		J	K
Série normale	$6 \leq d \leq 22$	0 -100	+100 0
	$22 < d \leq 130$	0 -200	+200 0
Série mince	$12 \leq d \leq 50$	0 -100	+100 0
	$50 < d \leq 150$	0 -200	+200 0

- Conditions d'application des clavettes parallèles : couples répétés majoritairement unidirectionnels (rares changement de direction du couple), jamais de couples alternés à grand nombre de cycles !

Assemblages arbre-moyeu

- Calcul de la résistance de la clavette parallèle

- La section est proposée par la norme

Une norme n'impose jamais rien, et si il y a de bonnes raisons de s'en écarter, c'est possible, mais en général plus coûteux !

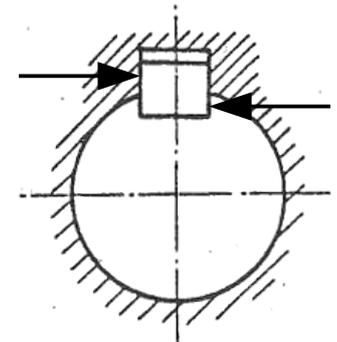
Si l'on reste dans le cadre d'application de la norme, mieux vaut y adhérer et calculer les éléments laissés au choix, c'est ce que l'on va faire ici...

→ Calcul de la longueur de clavette permettant de transmettre un couple donné, pour une section de clavette donnée.

- Paramètres de calcul : diamètre de l'arbre, section de la clavette selon la norme, matériaux utilisés.

- Deux modes de rupture : par cisaillement ou par matage

- Cisaillement : entre les deux logements arbre/moyeu
 - Matage : pression de surface > pression limite du matériau



Assemblages arbre-moyeu

- Les clavettes sont dimensionnées en proportion avec la résistance de l'arbre sur lequel elle sont montées
- Calcul du cisaillement sur la surface aL

Le cisaillement est dû aux efforts du couple transmis : on va supposer que le point d'application de la force est défavorable (le plus bas possible)

- L'effort périphérique vaut , pour le noyau de l'arbre de diamètre $d' = 2J - d$

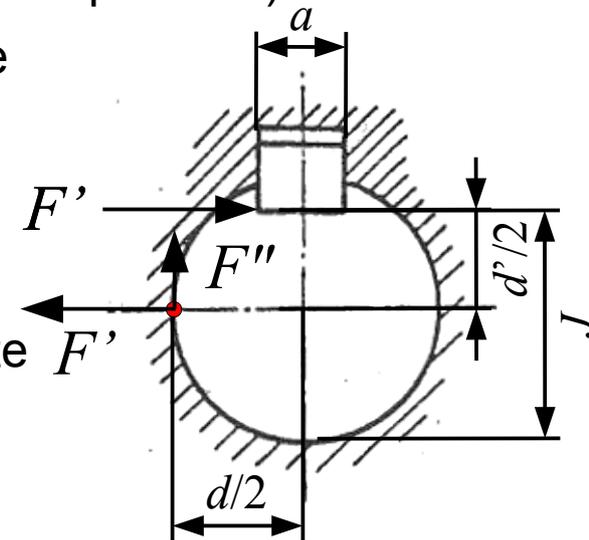
$$F = \frac{2M_t}{d'}$$

- Suite à l'arc-boutement, les efforts de frottement sur le pourtour de l'arbre à 90° de la clavette se placent au point rouge. En écrivant l'équilibre des moments, on obtient $F = F' + F'' d/d'$

avec $F'' = F' f$, f étant le coefficient de frottement.

On peut prendre $f=0.2$ (acier/acier non lubrifié) ou 0.1 pour plus de sécurité.

- On a donc
$$F' = \frac{F}{1 + f \frac{d}{d'}} = \frac{2M_t}{d' + d f}$$



Assemblages arbre-moyeu

- Résistance limite en cisaillement

- Calcul de la longueur de clavette :

$$\tau = \frac{F'}{aL} = \frac{2M_t}{aL(2J-d+df)} < \tau_{\text{lim}} \quad \left(= \frac{2}{3} \cdot \frac{3}{5} R_{\text{lim}} \text{ par exemple pour une contrainte répétée, en cisaillement} \right)$$

$$L > \frac{5M_t}{aR_{\text{lim}}(2J-d+df)}$$

- Prenons un arbre, soumis à un moment de torsion pure répétée: en fonction du diamètre, quel est le couple maximal transmissible ?

Le diamètre est ici d' , diamètre du noyau (non entaillé!)

$$M_t < \frac{\pi d'^3 R_{ar}}{32}$$

$$R_{ar} = \frac{2}{3} R_{\text{lim}, ar}$$

Exemple de coefficient relié à une sollicitation répétée !

$$M_t < \frac{2}{3} \frac{\pi (2J-d)^3 R_{\text{lim}, ar}}{32}$$

Assemblages arbre-moyeu

- Quelle longueur L pour permettre l'entraînement au couple maximal transmissible par l'arbre ?

$$M_t = \frac{2}{3} \frac{\pi (2J - d)^3 R_{\text{lim}, ar}}{32} \quad L > \frac{5 M_t}{a R_{\text{lim}} (2J - d + d f)}$$

$$\longrightarrow L > \frac{5 \pi (2J - d)^3}{48 a (2J - d + d f)} \cdot \frac{R_{\text{lim}, ar}}{R_{\text{lim}}}$$

- Testons avec les valeurs de la norme...

$$d=8, a=2, b=2, J=d-1.2=6.8, f=0.2 \rightarrow L > 4.0 \frac{R_{\text{lim}, ar}}{R_{\text{lim}}} \quad (L_{\text{min}}=6)$$

$$d=12, a=4, b=4, J=d-2.5=9.5, f=0.2 \rightarrow L > 3.0 \frac{R_{\text{lim}, ar}}{R_{\text{lim}}} \quad (L_{\text{min}}=8)$$

$$d=50, a=14, b=9, J=d-5.5=44.5, f=0.2 \rightarrow L > 30 \frac{R_{\text{lim}, ar}}{R_{\text{lim}}} \quad (L_{\text{min}}=36)$$

$$d=65, a=18, b=11, J=d-7=58, f=0.2 \rightarrow L > 38 \frac{R_{\text{lim}, ar}}{R_{\text{lim}}} \quad (L_{\text{min}}=50)$$

$$d=110, a=28, b=16, J=d-10=100, f=0.2 \rightarrow L > 76 \frac{R_{\text{lim}, ar}}{R_{\text{lim}}} \quad (L_{\text{min}}=80)$$

Assemblages arbre-moyeu

- Résistance limite au matage

- Ici, on doit évaluer la pression surfacique sur les flancs de la clavette
Le matage endommagera l'arbre ou le moyeu, dont le matériau est en principe moins dur que la clavette

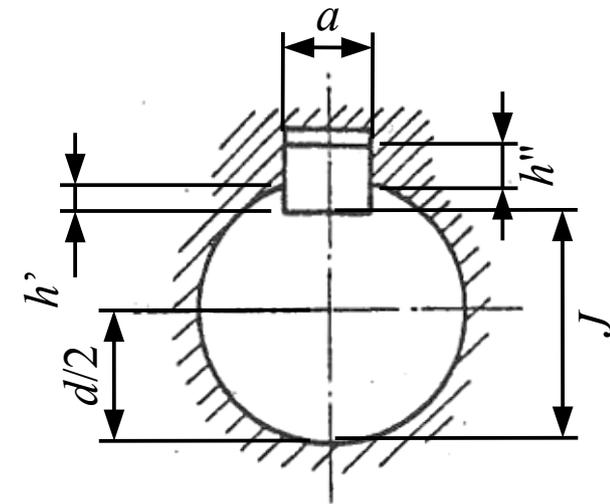
$$F' = \frac{F}{1 + f \frac{d}{d'}} = \frac{2 M_t}{d' + d f} \quad d' = 2J - d$$

$$\sigma = \frac{F'}{h' L} = \frac{2 M_t}{(2J - d + f d) \cdot \left((d - J) - \frac{1}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2}) \right) L} < \sigma_{\text{lim}}$$

- On pose $\sigma_{\text{lim}} = R_{\text{lim,ar}}$

Avec $M_t < \frac{2}{3} \frac{\pi (2J - d)^3 R_{\text{lim,ar}}}{32}$, il vient :

$$R_{\text{lim,ar}} > \frac{\pi (2J - d)^3 R_{\text{lim,ar}}}{24 \cdot (2J - d + f d) \cdot \left((d - J) - \frac{1}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2}) \right) L}$$



$$h' = (d - J) - \frac{1}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2})$$

$$h'' = b - h'$$

Assemblages arbre-moyeu

- Quelle longueur L pour permettre l'entraînement au couple maximal transmissible par l'arbre (bis) ?

$$L > \frac{\pi(2J-d)^3}{24 \cdot (2J-d+fd) \cdot \left((d-J) - \frac{1}{2}(d-\sqrt{d^2-a^2}) \right)}$$

- Testons avec les valeurs de la norme ...

$$d=8, \quad a=2, \quad b=2, \quad J=d-1.2=6.8, \quad f=0.2 \rightarrow L > 3 \quad (L_{min}=6)$$

$$d=12, \quad a=4, \quad b=4, \quad J=d-2.5=9.5, \quad f=0.2 \rightarrow L > 2.3 \quad (L_{min}=8)$$

$$d=50, \quad a=14, \quad b=9, \quad J=d-5.5=44.5, \quad f=0.2 \rightarrow L > 36 \quad (L_{min}=36)$$

$$d=65, \quad a=18, \quad b=11, \quad J=d-7=58, \quad f=0.2 \rightarrow L > 48 \quad (L_{min}=50)$$

$$d=110, \quad a=28, \quad b=16, \quad J=d-10=100, \quad f=0.2 \rightarrow L > 100 \quad (L_{min}=80)$$

Assemblages arbre-moyeu

- Dimensionnement des clavettes parallèles

- La matière de la clavette en général un peu « meilleure » que celle de l'arbre et du moyeu

La norme indique qu'il faut choisir un acier avec $R_0 = 600$ MPa ; ce qui donne un $R_{\max} \sim 130$ MPa dans les conditions habituelles, e.g. St60 / E335

De ce point de vue, la sécurité en cisaillement est généralement excellente.

- **Le matage de l'arbre est généralement l'élément dimensionnant, sauf si le moyeu est moins résistant que l'arbre, dans ce cas il faut dimensionner au matage dans le moyeu**
 - **En première approximation, on peut choisir $L = d$ dans le cas d'un emmanchement fixe, sauf pour les arbres de diamètre > 100 mm**
 - Toujours vérifier !
 - Si le matériau du moyeu est beaucoup plus tendre (p.e. aluminium), alors il faut dimensionner en fonction de ce matériau et allonger la clavette en proportion....

$$L > \frac{\pi (2J - d)^3}{24 \cdot (2J - d + f d) \cdot \left((d - J) - \frac{1}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2}) \right)} \frac{R_{\lim_ar}}{R_{\lim_moy}}$$

Assemblages arbre-moyeu

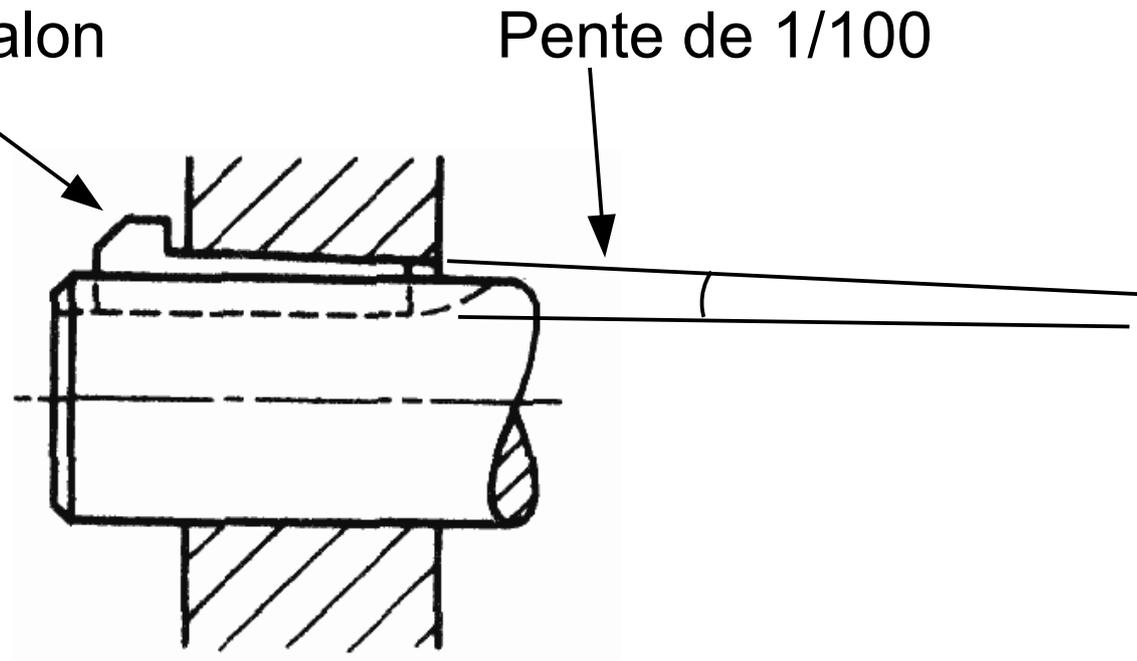
- Dimensionnement des clavettes parallèles (suite)
 - Dans le cas d'un emmanchement mobile (à charge nulle), on divise les efforts transmissibles par 3 $\rightarrow L$ doit être 3x plus grand !
 - Dans le cas d'un emmanchement glissant pendant la transmission d'efforts, on divise par 6 \rightarrow il est souvent impossible de trouver une clavette permettant cela sans sortir des dimensions raisonnables : $L < 2.5d$. Cela signifie que l'arbre sera nécessairement surdimensionné (il faut modifier d)
 - Pour la série mince, la longueur doit être *grosso-modo* multipliée par deux par rapport à la série normale (faites les calculs par vous même avec la norme)
 - Le choix de la longueur se fait en général dans une série géométrique (série de Renard) !
 - En général, toutes les dimensions linéaires au choix doivent en principe être choisies dans un **série de Renard** (slides suivant)

Séries de base				Arrondi 1			Arrondi 2		
R5	R10	R20	R40	R'10	R'20	R'40	R''5	R''10	R''20
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.0	1.0	1.0
			1.06			1.05			
		1.12	1.12		1.12	1.12			1.1
			1.18			1.20			
	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25		1.2	1.2
			1.32			1.30			
		1.40	1.40		1.40	1.40			1.4
			1.50			1.50			
1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.5	1.5	1.6
			1.70			1.70			
		1.80	1.80		1.80	1.80			1.8
			1.90			1.90			
	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00		2.0	2.0
			2.12			2.10			
		2.24	2.24			2.20			2.2
			2.36			2.40			
2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.5	2.5	2.5
			2.65			2.60			
		2.80	2.80		2.80	2.80			2.8
			3.00			3.00			
	3.15	3.15	3.15	3.20	3.20	3.20		3.0	3.0
			3.35			3.40			
		3.55	3.55			3.60			3.5
			3.75			3.80			
4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.0	4.0	4.0
			4.25			4.20			
		4.50	4.50		4.50	4.50			4.5
			4.75			4.80			
	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00		5.0	5.0
			5.30			5.30			
		5.60	5.60		5.60	5.60			5.5
			6.00			6.00			
6.30	6.30	6.30	6.30	6.30	6.30	6.30	6.0	6.0	6.0
			6.70			6.70			
		7.10	7.10		7.10	7.10			7.0
			7.50			7.50			
	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00		8.0	8.0
			8.50			8.50			
		9.00	9.00		9.00	9.00			9.0
			9.50			9.50			
10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10	10	10

Assemblages arbre-moyeu

- Clavettes à faces inclinées

- Avec ou sans talon



- Permet la reprise de couples **alternés**
 - Ne permet pas de liaison mobile

Assemblages arbre-moyeu

■ Principe

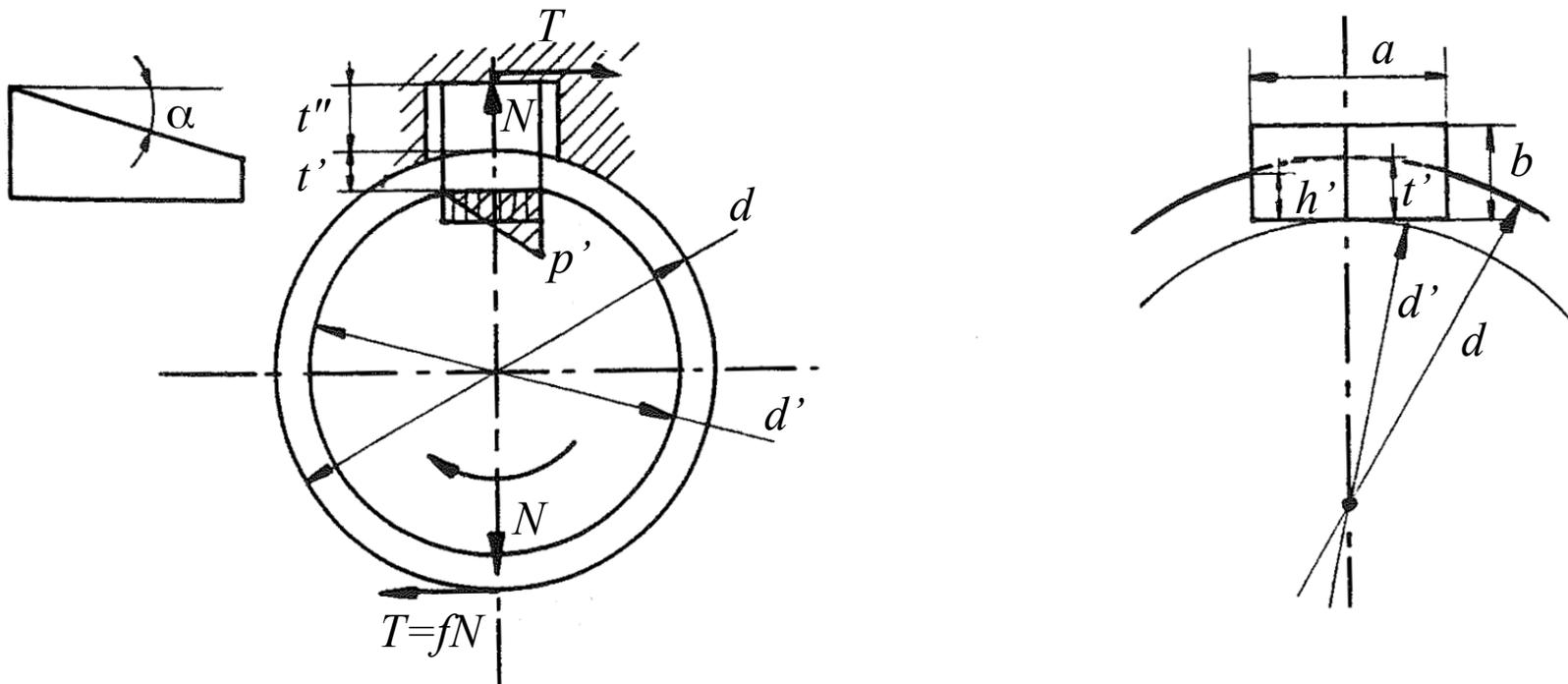
Le fait de chasser la clavette dans son logement génère des efforts radiaux grâce à la pente de 1/100

La pente est suffisante pour que la clavette ne puisse pas ressortir par elle-même (il faudrait un coefficient de frottement de l'ordre de 0.01!)

- On a donc une précontrainte, qui va générer des efforts sur l'arbre permettant d'entraîner le moyeu par simple frottement.
- La clavette est dimensionnée au matage, cette fois-ci sur ses faces inférieures et supérieures.
- La clavette travaille également en cisaillement, **la vérification au cisaillement est identique à celle des clavettes à faces parallèles**
- Les dimensions standard des clavettes sont les mêmes que les clavettes droites, à l'exception de la pente de 1/100^{ème}

Assemblages arbre-moyeu

- Calcul des clavettes à faces inclinées
 - On doit vérifier que la pression de contact radiale ne dépasse pas la valeur de matage
 - L'objectif est qu'il n'y ait pas décollement, d'une part, et que la pression locale ne dépasse pas la pression de matage, d'autre part.

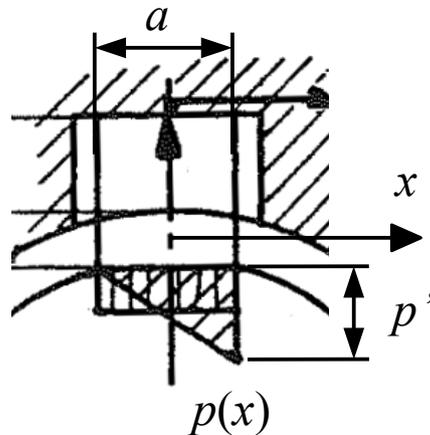


Assemblages arbre-moyeu

- Comme précédemment, on va essayer de transmettre le moment maximal qu'un arbre peut supporter :

$$M_t < \frac{2}{3} \frac{\pi (2J - d)^3 R_{\text{lim}, ar}}{32}$$

- Au repos, la cale développe une pression uniforme p au niveau des faces d'appui radiales, de résultante N : $N = p a L$
- Lors de l'application d'un couple, la pression de contact radiale p , qui était uniforme, prend un profil trapézoïdal $p(x)$, suite à la rotation (élastique) de l'arbre d'un angle $d\Phi$. La résultante N reste, quand à elle, inchangée.
- On va se placer à l'état limite pour lequel la répartition devient triangulaire (donc au-delà, la clavette se décolle d'un côté). On peut exprimer N en fonction de la pression maximale p' .



$$p(x) = \frac{p'}{a} (x + a/2)$$

$$N = p a L = \int_{-a/2}^{a/2} p(x) dx = \frac{p' a L}{2} \rightarrow p' = 2 p$$

Assemblages arbre-moyeu

Le couple de frottement, équivalent à M_t , résultera des deux efforts tangentiels T situé à $d/2$ et $d/2+h''$, et de la dissymétrie de la répartition triangulaire

$$p(x) = \frac{p'}{a}(x+a/2)$$

$$C_f = N f \frac{d}{2} + N f \left(\frac{d}{2} + h''\right) + \int_{-a/2}^{a/2} p(x) \cdot x dx$$

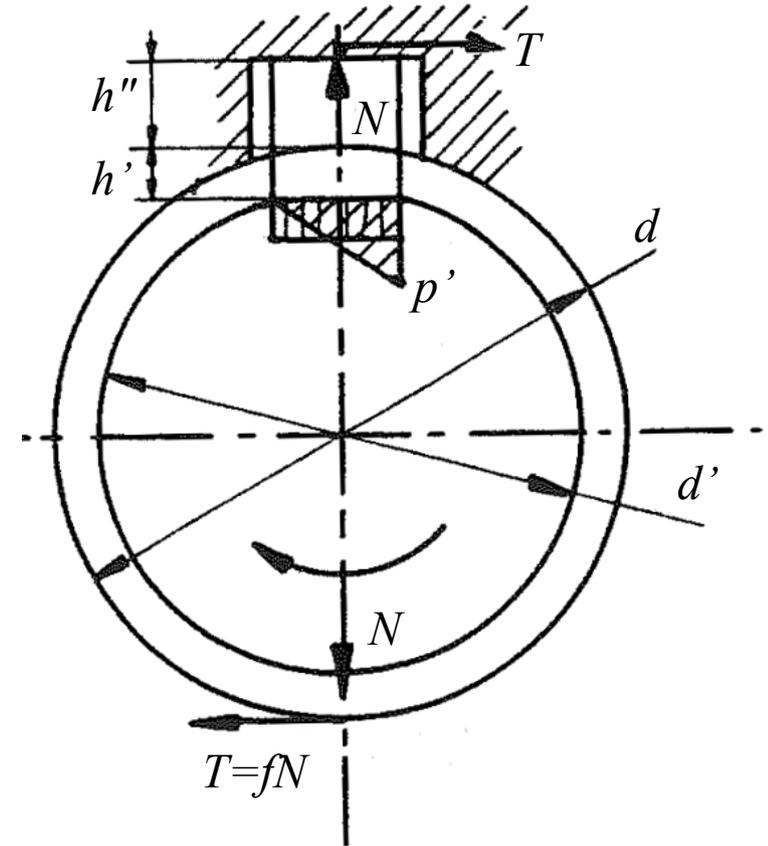
$$C_f = N f \frac{d}{2} + N f \left(\frac{d}{2} + h''\right) + N \frac{a}{6}$$

- D'où :

$$C_f = \frac{p' a L}{2} \left(f(d+h'') + \frac{a}{6} \right)$$

- En reportant le couple maxi transmissible par l'arbre, on obtient :

$$\frac{2}{3} \frac{\pi (2J-d)^3}{32} R_{\text{lim, ar}} = \frac{p' a L}{2} \left(f(d+h'') + \frac{a}{6} \right)$$



Assemblages arbre-moyeu

- Calculons p' en fonction du reste :

$$p' = \frac{1}{24} \frac{\pi (2J - d)^3 R_{\text{lim, ar}}}{a L \left(f \left(d + h'' \right) + \frac{a}{6} \right)}$$

$$h' = (d - J) - \frac{1}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2})$$

$$h'' = b - h'$$

- p' ne doit pas dépasser la charge admissible en matage, environ $R_{\text{lim, ar}}$.

$$p' = \frac{1}{24} \frac{\pi (2J - d)^3 R_{\text{lim, ar}}}{a L \left(f \left(b + J + \frac{1}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2}) \right) + \frac{a}{6} \right)} < R_{\text{lim, ar}}$$

- d'où :

$$L > \frac{1}{24} \frac{\pi (2J - d)^3}{a f \left(b + J + \frac{1}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2}) \right) + \frac{a^2}{6}}$$

Assemblages arbre-moyeu

- Quelle longueur L pour permettre l'entraînement au couple maximal transmissible par l'arbre (ter) ?

$$L > \frac{1}{24} \frac{\pi(2J-d)^3}{af(b+J+\frac{1}{2}(d-\sqrt{d^2-a^2}))+\frac{a^2}{6}}$$

- Testons avec les valeurs de la norme ...

$$d=8, a=2, b=2, J=d-1.2=6.8, f=0.2 \rightarrow L > 5.4 \quad (L_{min}=6)$$

$$d=12, a=4, b=4, J=d-2.5=9.5, f=0.2 \rightarrow L > 3.3 \quad (L_{min}=8)$$

$$d=50, a=14, b=9, J=d-5.5=44.5, f=0.2 \rightarrow L > 42 \quad (L_{min}=36)$$

$$d=65, a=18, b=11, J=d-7=58, f=0.2 \rightarrow L > 56 \quad (L_{min}=50)$$

$$d=110, a=28, b=16, J=d-10=100, f=0.2 \rightarrow L > 120 \quad (L_{min}=80)$$

- Grosso modo, mêmes conclusions que pour les clavettes parallèles !

Assemblages arbre-moyeu

- Quel effort F appliquer lors du placement de la clavette pour avoir la bonne pression p ?

p vaut ici $p'/2$. On va se mettre dans le cas le plus défavorable :

$$p' = R_{\text{lim,ar}}$$

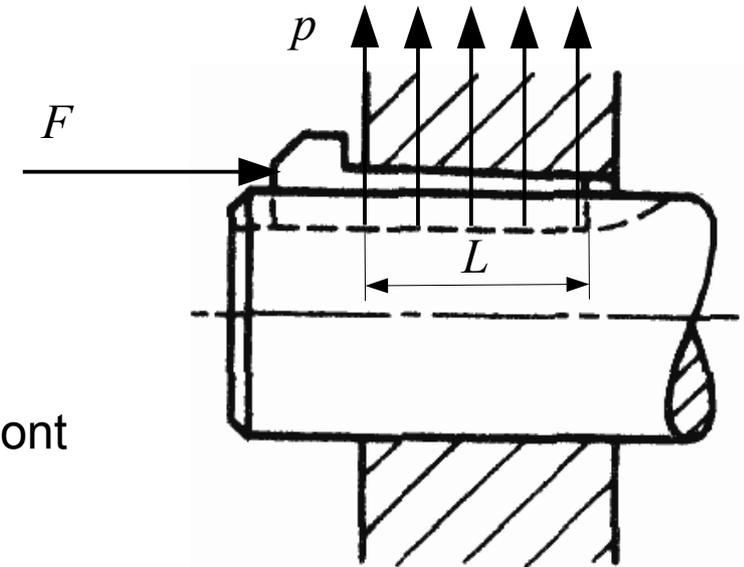
$$\text{Donc, } N = \frac{p' a L}{2} = \frac{R_{\text{lim,ar}} a L}{2}$$

- On a glissement si les forces de frottement sont vaincues. Elle valent ici (au maximum) :

$$F_{f_{\text{max}}} = N \cdot f$$

- La force appliquée devra donc atteindre cette limite :

$$F = \frac{R_{\text{lim,ar}} a L}{2} f$$



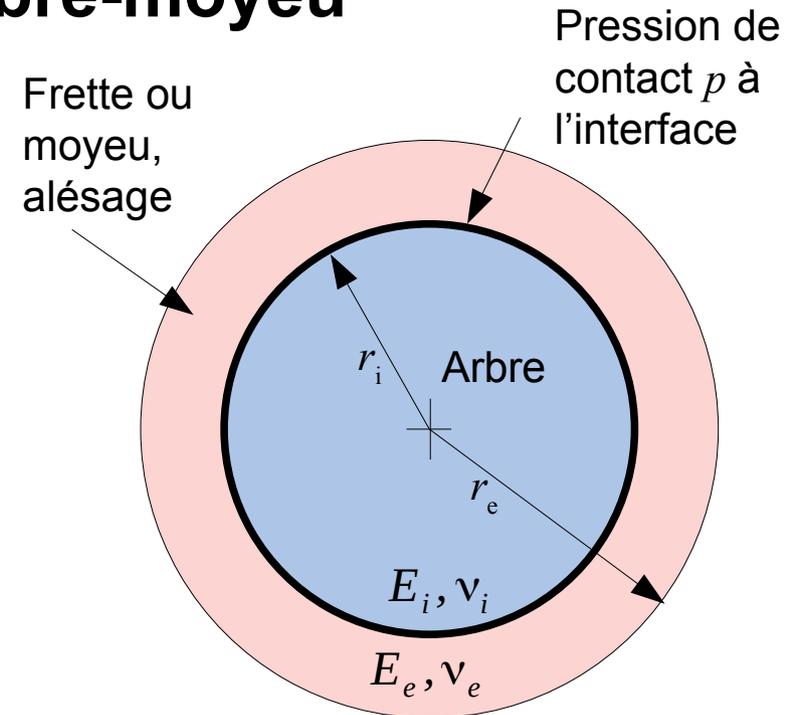
Assemblages arbre-moyeu

■ Frettage

Principe : utilisation de l'élasticité naturelle des éléments composant la liaison pour assurer un serrage permettant la transmission d'efforts.

- Les ajustements entre arbre et alésage (moyeu) sont déterminés pour une fonction particulière :

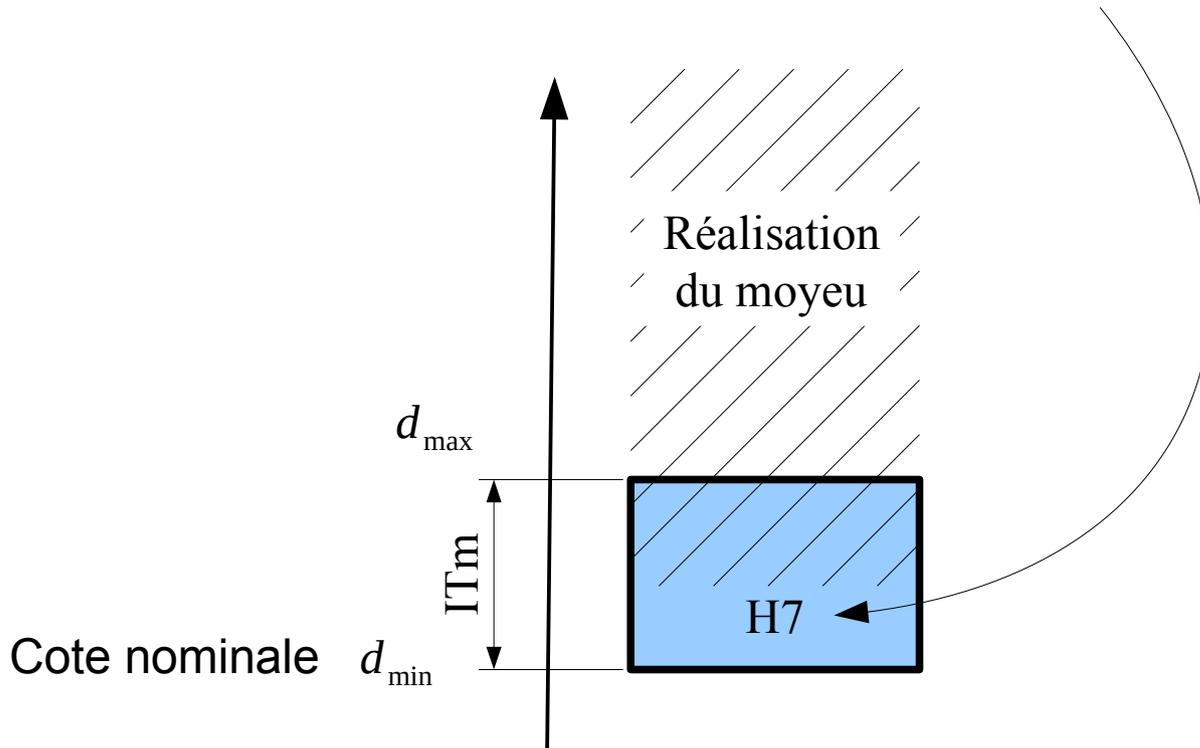
- Glissement : par exemple ajustement H7g6 – permet de s'assurer que, malgré les tolérances de fabrication, toutes les pièces ne sont jamais en interférence
- Frettage : à l'inverse, on souhaite justement un interférence. Le montage se fera au maillet, à la presse ou par dilatation thermique.
- Certains montages sont démontables sans endommagement, d'autres sont définitifs : cela dépend des cotes précises des éléments ...



Assemblages arbre-moyeu

- Ajustements ISO

- Permettent d'assurer une fonction (glissement vs. Serrage)
- Alésages : position du nominal : lettre majuscule + qualité (définit l'intervalle de tolérance)



Exemple :
25H7 =

Assemblages arbre-moyeu

- Intervalles de tolérances IT – ajustements ISO

paliers de dimensions en mm	qualités																		
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14*	15*	16*	
≤3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600	
> 3 à 6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750	
> 6 à 10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900	
> 10 à 18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100	
> 18 à 30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300	
> 30 à 50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600	
> 50 à 80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900	
> 80 à 120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200	
> 120 à 180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500	
> 180 à 250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900	
> 250 à 315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200	
> 315 à 400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600	
> 400 à 500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000	
tolérances fondamentales en microns																			
* les qualités 14, 15, 16 ne sont prévues qu'au-delà de 1 mm																			

Ecarts fondamentaux des arbres

Guide pratique d'utilisation

Symbole	Ecart fondamental											Ecart supérieur es											Ecart inférieur ei																	
	Lettre	a*	b*	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js	j			k			m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc							
		Qualité	Toutes qualités											Toutes qualités																										
Ecarts fondamentaux en microns	paliers de dimensions nominales en millimètres	* <3	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	--	+18	--	+20	--	+26	+32	+40	+60								
		> 3 à 6	-270	-140	-70	-46	-30	-20	-14	-10	-6	-4	0	-2	-4	--	+1	0	+4	+8	+12	+15	+19	--	+23	--	+28	--	+35	+42	+50	+80								
		> 6 à 10	-280	-150	-80	-56	-40	-25	-18	-13	-8	-5	0	-2	-5	--	+1	0	+6	+10	+15	+19	+23	--	+28	--	+34	--	+42	+52	+67	+97								
		> 10 à 14	-290	-150	-95	--	-50	-32	--	-16	--	-6	0	-3	-6	--	+1	0	+7	+12	+18	+23	+28	--	+33	--	+40	--	+50	+64	+90	+130								
		> 14 à 18	-300	-160	-110	--	-65	-40	--	-20	--	-7	0	-4	-8	--	+2	0	+8	+15	+22	+28	+35	--	+41	+47	+54	+63	+73	+98	+136	+188								
		> 18 à 24	-310	-170	-120	--	-80	-50	--	-25	--	-9	0	-5	-10	--	+2	0	+9	+17	+26	+34	+43	--	+48	+60	+68	+80	+94	+112	+148	+200	+274							
		> 24 à 30	-320	-180	-130	--	-90	-60	--	-30	--	-10	0	-6	-12	--	+2	0	+11	+20	+32	+41	+53	--	+54	+70	+81	+97	+114	+136	+180	+242	+325							
		> 30 à 40	-340	-190	-140	--	-100	-70	--	-35	--	-11	0	-7	-15	--	+2	0	+12	+22	+35	+43	+57	--	+66	+82	+102	+122	+144	+172	+226	+300	+405							
		> 40 à 50	-360	-200	-150	--	-110	-80	--	-40	--	-12	0	-9	-15	--	+3	0	+13	+23	+37	+45	+61	--	+68	+85	+107	+132	+162	+204	+264	+348	+468							
		> 50 à 65	-380	-220	-170	--	-120	-90	--	-45	--	-13	0	-11	-18	--	+3	0	+15	+27	+43	+51	+71	--	+75	+95	+121	+150	+186	+234	+300	+396	+516							
		> 65 à 80	-400	-240	-190	--	-130	-100	--	-50	--	-14	0	-13	-21	--	+4	0	+17	+31	+50	+58	+81	--	+85	+107	+137	+170	+210	+264	+336	+444	+588							
		> 80 à 100	-420	-260	-210	--	-145	-110	--	-55	--	-15	0	-16	-26	--	+4	0	+20	+34	+56	+63	+92	--	+97	+122	+158	+200	+252	+324	+420	+540	+700	+900						
		> 100 à 120	-440	-280	-230	--	-160	-120	--	-60	--	-16	0	-18	-28	--	+4	0	+21	+37	+62	+68	+108	--	+114	+144	+186	+234	+294	+372	+480	+612	+792	+1008						
		> 120 à 140	-460	-300	-250	--	-170	-130	--	-65	--	-17	0	-20	-32	--	+5	0	+23	+40	+68	+74	+116	--	+122	+156	+204	+264	+336	+432	+552	+708	+912	+1152						
		> 140 à 160	-480	-320	-270	--	-180	-140	--	-70	--	-18	0	-22	-36	--	+5	0	+25	+44	+76	+81	+126	--	+132	+170	+222	+288	+366	+474	+606	+786	+1008	+1272						
		> 160 à 180	-500	-340	-290	--	-190	-150	--	-75	--	-19	0	-24	-40	--	+5	0	+27	+48	+84	+88	+136	--	+144	+186	+246	+318	+414	+522	+666	+876	+1116	+1416						
		> 180 à 200	-520	-360	-310	--	-200	-160	--	-80	--	-20	0	-26	-46	--	+5	0	+29	+52	+92	+96	+144	--	+152	+200	+264	+342	+450	+570	+720	+936	+1188	+1512						
> 200 à 225	-540	-380	-330	--	-210	-170	--	-85	--	-21	0	-28	-52	--	+5	0	+31	+56	+98	+102	+150	--	+160	+210	+276	+360	+474	+600	+762	+990	+1260	+1596								
> 225 à 250	-560	-400	-350	--	-220	-180	--	-90	--	-22	0	-30	-58	--	+5	0	+33	+62	+104	+108	+156	--	+168	+220	+288	+378	+498	+630	+810	+1050	+1350	+1710								
> 250 à 280	-580	-420	-370	--	-230	-190	--	-95	--	-23	0	-32	-64	--	+5	0	+35	+68	+108	+112	+162	--	+174	+228	+300	+402	+522	+660	+840	+1092	+1416	+1788								
> 280 à 315	-600	-440	-390	--	-240	-200	--	-100	--	-24	0	-34	-70	--	+5	0	+37	+74	+112	+116	+168	--	+180	+240	+312	+414	+540	+702	+900	+1164	+1500	+1896								
> 315 à 355	-620	-460	-410	--	-250	-210	--	-105	--	-25	0	-36	-76	--	+5	0	+39	+80	+116	+120	+174	--	+186	+246	+324	+426	+552	+726	+936	+1212	+1560	+2016								
> 355 à 400	-640	-480	-430	--	-260	-220	--	-110	--	-26	0	-38	-82	--	+5	0	+41	+86	+120	+124	+180	--	+192	+252	+336	+438	+570	+750	+972	+1260	+1620	+2088								
> 400 à 450	-660	-500	-450	--	-270	-230	--	-115	--	-27	0	-40	-88	--	+5	0	+43	+92	+124	+128	+186	--	+198	+258	+342	+444	+576	+762	+996	+1296	+1680	+2232								
> 450 à 500	-680	-520	-470	--	-280	-240	--	-120	--	-28	0	-42	-94	--	+5	0	+45	+98	+128	+132	+192	--	+204	+264	+354	+456	+588	+780	+1020	+1320	+1716	+2280								

* les arbres a et b ne sont prévus qu'au-delà de 1mm.

** pour js des qualités 7 à 11, arrondir la valeur de IT en microns, si elle est impaire, à la valeur paire immédiatement inférieure

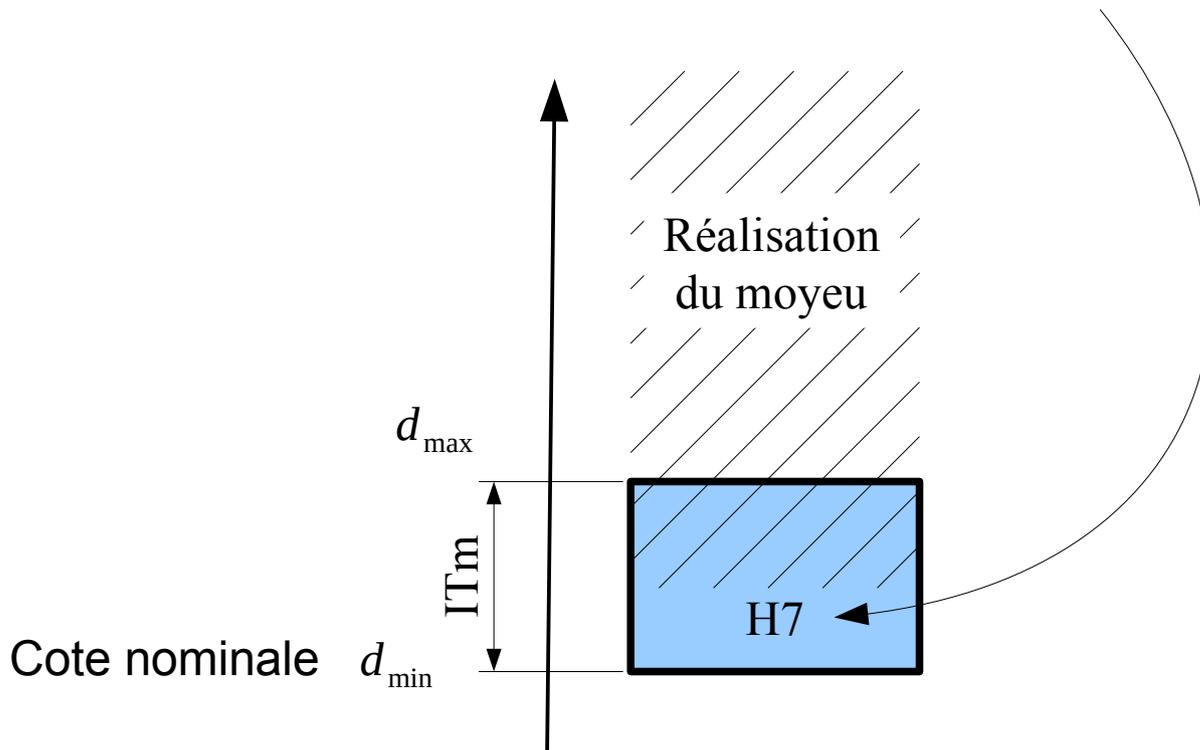
Traduction d'une cote ISO en cote bilimite		
Cote ISO	Exemple	
40 f 7	32 K 6	
Dimension nominale	40	32
Qualité	7	6
IT (µm)	50-25=25	16
Position	f	K
Δ		5
ES (tableaux)		-2 + Δ = 3
ES = EI + IT		
es (tableaux)	-25	
es = ei + IT		
EI (tableaux)		3 - 16 = -13
EI = ES - IT		
ei (tableaux)		
ei = es - IT		
Cote bilimitée	µm	
	-25	+3
	40 - 50	32 - 13
	Exemple	
Traduction d'une cote bilimite en cote ISO		

Ecarts fondamentaux des alésages

Symbole	Ecart fondamental											Ecart inférieur EI											Ecart supérieur ES																		Δ en microns							
	Lettre	A*	B*	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H	Js	J			K			M	N	P à Zc	P	R	S	T	U	V	X	Y	Z	ZA	ZB	ZC	Qualités													
		Qualité	Toutes qualités											Toutes qualités																		Qualités																
Ecarts fondamentaux en microns	paliers de dimensions en millimètres	* <3	+270	+140	+60	+34	+20	+14	+10	+6	+4	+2	0	+2	+4	+6	0	0	-2	-2	-4	-4	-6	-10	-14	--	-18	--	-20	--	-26	-32	-40	-60	Δ = 0													
		> 3 à 6	+270	+140	+70	+46	+30	+20	+14	+10	+6	+4	0	+5	+6	+10	-1+Δ	0	-4+Δ	-4	-8+Δ	0	-12	-15	-19	--	-23	--	-28	--	-35	-42	-50	-80	1	1,5	1	3	4	6								
		> 6 à 10	+280	+150	+80	+56	+40	+25	+18	+13	+8	+5	0	+5	+8	+12	-1+Δ	0	-6+Δ	-6	-10+Δ	0	-15	-19	-23	--	-28	--	-34	--	-42	-52	-67	-97	1	1,5	2	3	6	7								
		> 10 à 14	+290	+150	+95	--	+50	+32	--	+16	--	+6	0	+6	+10	+15	-1+Δ	0	-7+Δ	-7	-12+Δ	0	-18	-23	-28	--	-33	--	-40	--	-50	-64	-90	-130	1	2	3	3	7	9								
		> 14 à 18	+300	+160	+110	--	+65	+40	--	+20	--	+7	0	+8	+12	+20	-2+Δ	0	-8+Δ	-8	-15+Δ	0	-22	-28	-35	--	-41	-48	-54	-68	-73	-98	-136	-188	1,5	2	3	4	8	12								
		> 18 à 24	+310	+170	+120	--	+80	+50	--	+25	--	+9	0	+10	+14	+24	-2+Δ	0	-9+Δ	-9	-17+Δ	0	-26	-34	-43	--	-48	-60	-63	-80	-94	-112	-148	-200	-274	1,5	3	4	5	9	14							
		> 24 à 30	+320	+180	+130	--	+90	+60	--	+30	--	+10	0	+13	+18	+28	-2+Δ	0	-11+Δ	-11	-20+Δ	0	-32	-41	-53	--	-54	-70	-81	-97	-114	-136	-180	-242	-325	2	3	5	6	11	16							
		> 30 à 40	+340	+190	+140	--	+100	+70	--	+35	--	+11	0	+16	+22	+34	-3+Δ	0	-13+Δ	-13	-23+Δ	0	-37	-43	-59	--	-66	-87	-102	-122	-144	-172	-226	-300	-405	2	4	5	7	13	19							
		> 40 à 50	+360	+200	+150	--	+110	+80	--	+40	--	+12	0	+18	+26	+41	-3+Δ	0	-15+Δ	-15	-27+Δ	0	-43	-51	-71	--	-75	-102	-120	-146	-174	-210	-274	-360	-480	2	4	5	7	13	19							
		> 50 à 65	+380	+220	+170	--	+120	+90	--	+45	--	+13	0	+22	+30	+47	-4+Δ	0	-17+Δ	-17	-31+Δ	0	-43	-54	-79	--	-84	-114	-144	-172	-210	-254	-310	-400	-525	-690	3	4	6	7	15	23						
		> 65 à 80	+400	+240	+180	--	+130	+100	--	+50	--	+14	0	+25	+36	+55	-4+Δ	0	-20+Δ	-20	-34+Δ	0	-43	-55	-82	--	-87	-122	-170	-202	-248	-300	-365	-470	-620	-800	3	4	6	7	15	23						
		> 80 à 100	+420	+260	+200	--	+140	+110	--	+55	--	+15	0	+28	+40	+61	-5+Δ	0	-23+Δ	-23	-39+Δ	0	-43	-58	-92	--	-97	-132	-190	-222	-280	-340	-415	-535	-700	-900	3	4	6	7	15	23						
		> 100 à 120	+440	+280	+220	--	+150	+120	--	+60	--	+16	0	+32	+46	+71	-6+Δ	0	-26+Δ	-26	-43+Δ	0	-43	-60	-104	--	-109	-144	-202	-248	-310	-380	-465	-600	-780	-1000	3	4	6	9	17	26						
		> 120 à 140	+460	+300	+240	--	+160	+130	--	+65	--	+17	0	+36	+52	+81	-7+Δ	0	-30+Δ	-30	-49+Δ	0	-43	-62	-114	--	-119	-156	-216	-264	-330	-410	-520	-660	-840	-1080	3	4	6	9	17	26						
		> 140 à 160	+480	+320	+260	--	+170	+140	--	+70	--	+18	0	+40	+58	+91	-8+Δ	0	-34+Δ	-34	-55+Δ	0	-43	-64	-126	--	-131	-174	-234	-288	-360	-450	-570	-720	-900	-1150	3	4	6	9	17	26						
		> 160 à 180	+500	+340	+280	--	+180	+150	--	+75	--	+19	0	+44	+64																																	

Assemblages arbre-moyeu

- Ajustements ISO
 - Permettent d'assurer une fonction (glissement vs. Serrage)
 - Alésages : position du nominal : lettre majuscule + qualité (définit l'intervalle de tolérance)

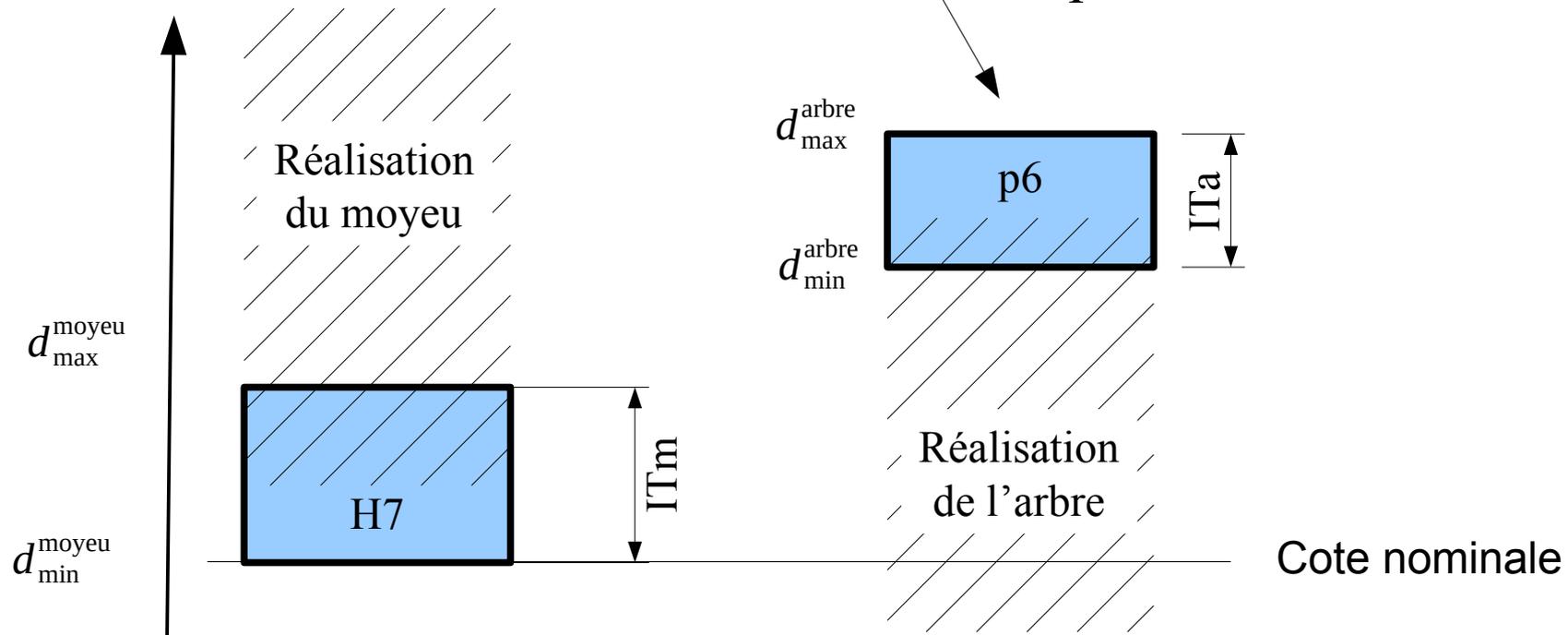


Exemple : $25H7 = 25^{+21\mu m}_0$

Assemblages arbre-moyeu

- Ajustements ISO

- Arbres : position du nominal : lettre minuscule + qualité (définit l'intervalle de tolérance)



Assemblages arbre-moyeu

- Intervalles de tolérances IT – ajustements ISO

paliers de dimensions en mm	qualités																		
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14*	15*	16*	
≤3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600	
> 3 à	6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
> 6 à	10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
> 10 à	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100
> 18 à	30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300
> 30 à	50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600
> 50 à	80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900
> 80 à	120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200
> 120 à	180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500
> 180 à	250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900
> 250 à	315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200
> 315 à	400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600
> 400 à	500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000
tolérances fondamentales en microns																			
* les qualités 14, 15, 16 ne sont prévues qu'au-delà de 1 mm																			

Ecarts fondamentaux des arbres

Guide pratique d'utilisation

Symbole	Ecart fondamental												Ecart supérieur es											Ecart inférieur ei													
	Lettre	a*	b*	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js	Toutes qualités											Toutes qualités												
		Qualité	Toutes qualités											Toutes qualités																							
Ecarts fondamentaux en microns	paliers de dimensions nominales en millimètres	* <3	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	--	+18	--	+20	--	+26	+32	+40	+60					
		> 3 à 6	-270	-140	-70	-46	-30	-20	-14	-10	-6	-4	0	-2	-4	--	+1	0	+4	+8	+12	+15	+19	--	+23	--	+28	--	+35	+42	+50	+80					
		> 6 à 10	-280	-150	-80	-56	-40	-25	-18	-13	-8	-5	0	-2	-5	--	+1	0	+6	+10	+15	+19	+23	--	+28	--	+34	--	+42	+52	+67	+97					
		> 10 à 14	-290	-150	-95	--	-50	-32	--	-16	--	-6	0	-3	-6	--	+1	0	+7	+12	+18	+23	+28	--	+33	--	+40	--	+50	+64	+90	+130					
		> 14 à 18	-290	-150	-95	--	-50	-32	--	-16	--	-6	0	-3	-6	--	+1	0	+7	+12	+18	+23	+28	--	+33	--	+40	--	+50	+64	+90	+130					
		> 18 à 24	-300	-160	-110	--	-65	-40	--	-20	--	-7	0	-4	-8	--	+2	0	+8	+15	+22	+28	+35	--	+41	+47	+54	+63	+73	+98	+136	+188					
		> 24 à 30	-300	-160	-110	--	-65	-40	--	-20	--	-7	0	-4	-8	--	+2	0	+8	+15	+22	+28	+35	--	+41	+47	+54	+63	+73	+98	+136	+188					
		> 30 à 40	-310	-170	-120	--	-80	-50	--	-25	--	-9	0	-5	-10	--	+2	0	+9	+17	+26	+34	+43	--	+48	+60	+68	+80	+94	+112	+148	+200	+274				
		> 40 à 50	-320	-180	-130	--	-100	-60	--	-30	--	-10	0	-7	-12	--	+2	0	+11	+20	+32	+41	+53	--	+54	+70	+81	+97	+114	+136	+180	+242	+325				
		> 50 à 65	-340	-190	-140	--	-120	-70	--	-36	--	-12	0	-9	-15	--	+3	0	+13	+23	+37	+43	+59	--	+59	+75	+102	+120	+146	+174	+210	+274	+360	+480			
		> 65 à 80	-360	-200	-150	--	-145	-85	--	-43	--	-14	0	-11	-18	--	+3	0	+15	+27	+43	+43	+63	--	+63	+92	+122	+170	+202	+248	+300	+365	+470	+620	+800		
		> 80 à 100	-380	-220	-170	--	-170	-100	--	-50	--	-15	0	-13	-21	--	+4	0	+17	+31	+50	+56	+84	--	+84	+140	+196	+284	+340	+425	+520	+640	+820	+1050	+1350		
		> 100 à 120	-410	-240	-180	--	-190	-110	--	-56	--	-17	0	-16	-26	--	+4	0	+20	+34	+56	+62	+94	--	+94	+158	+218	+315	+385	+475	+580	+710	+920	+1200	+1550		
		> 120 à 140	-460	-260	-200	--	-210	-125	--	-62	--	-18	0	-18	-28	--	+4	0	+21	+37	+62	+68	+98	--	+98	+170	+240	+350	+425	+525	+650	+790	+1000	+1300	+1700		
		> 140 à 160	-520	-280	-210	--	-230	-135	--	-68	--	-20	0	-20	-32	--	+5	0	+23	+40	+68	+74	+108	--	+108	+190	+268	+390	+475	+590	+730	+900	+1150	+1500	+1900		
		> 160 à 180	-580	-310	-230	--	-250	-150	--	-74	--	-22	0	-22	-34	--	+5	0	+25	+44	+74	+80	+114	--	+114	+208	+294	+435	+530	+660	+820	+1000	+1300	+1650	+2100		
		> 180 à 200	-660	-340	-240	--	-270	-165	--	-80	--	-24	0	-24	-36	--	+5	0	+27	+48	+80	+86	+126	--	+126	+232	+330	+490	+595	+740	+920	+1100	+1450	+1850	+2400		
> 200 à 225	-740	-380	-260	--	-300	-180	--	-88	--	-26	0	-26	-38	--	+5	0	+29	+52	+88	+94	+138	--	+138	+252	+354	+530	+640	+820	+1000	+1350	+1800	+2400					
> 225 à 250	-820	-420	-280	--	-330	-200	--	-96	--	-28	0	-28	-40	--	+5	0	+31	+56	+96	+102	+150	--	+150	+270	+378	+570	+680	+880	+1100	+1450	+1950	+2600					
> 250 à 280	-920	-480	-300	--	-360	-220	--	-104	--	-30	0	-30	-42	--	+5	0	+33	+60	+104	+110	+162	--	+162	+294	+414	+620	+740	+980	+1250	+1700	+2300	+3000					
> 280 à 315	-1050	-540	-330	--	-400	-240	--	-112	--	-32	0	-32	-44	--	+5	0	+35	+64	+108	+114	+174	--	+174	+318	+444	+670	+800	+1080	+1400	+1900	+2600	+3400					
> 315 à 355	-1200	-600	-360	--	-440	-260	--	-120	--	-34	0	-34	-46	--	+5	0	+37	+68	+114	+120	+180	--	+180	+330	+462	+700	+840	+1140	+1500	+2000	+2700	+3600					
> 355 à 400	-1350	-680	-400	--	-480	-280	--	-128	--	-36	0	-36	-48	--	+5	0	+39	+70	+118	+124	+192	--	+192	+342	+478	+720	+870	+1180	+1550	+2100	+2800	+3800					
> 400 à 450	-1500	-760	-440	--	-520	-300	--	-136	--	-38	0	-38	-50	--	+5	0	+41	+72	+120	+126	+204	--	+204	+354	+492	+740	+900	+1220	+1600	+2150	+2900	+3900					
> 450 à 500	-1650	-840	-480	--	-560	-320	--	-144	--	-40	0	-40	-52	--	+5	0	+43	+74	+122	+128	+210	--	+210	+360	+500	+750	+920	+1250	+1650	+2200	+3000	+4000					

Traduction d'une cote ISO en cote bilimite		
Cote ISO	Exemple	
40 f 7	32 K 6	
Dimension nominale	40	32
Qualité	7	6
IT (µm)	50-25=25	16
Position	f	K
Δ		5
ES (tableaux)		-2 + Δ = 3
ES = EI + IT		
es (tableaux)	-25	
es = ei + IT		
EI (tableaux)		3 - 16 = -13
EI = ES - IT		
ei (tableaux)		
ei = es - IT		
Cote bilimitée	µm	-25 40 - 50
	Exemple	+3 32 - 13

* les arbres a et b ne sont prévus qu'au-delà de 1mm.

** pour js des qualités 7 à 11, arrondir la valeur de IT en microns, si elle est impaire, à la valeur paire immédiatement inférieure

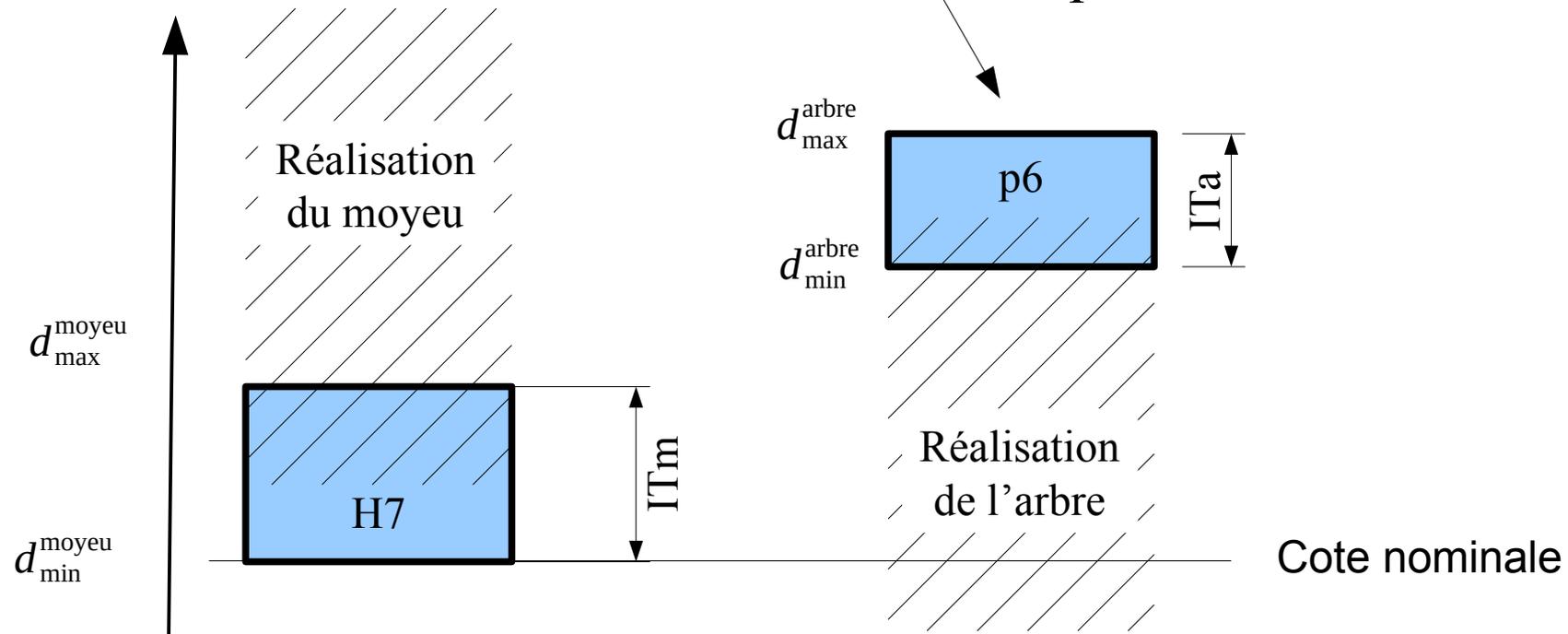
Ecarts fondamentaux des alésages

Symbole	Ecart fondamental												Ecart inférieur EI											Ecart supérieur ES													Δ en microns								
	Lettre	A*	B*	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H	Js	Toutes qualités											Toutes qualités													Qualités							
		Qualité	Toutes qualités											Toutes qualités													Qualités																		
Ecarts fondamentaux en microns	paliers de dimensions en millimètres	* <3	+270	+140	+60	+34	+20	+14	+10	+6	+4	+2	0	+2	+4	+6	0	0	-2	-2	-4	-4	-6	-10	-14	--	-18	--	-20	--	-26	-32	-40	-60	Δ = 0										
		> 3 à 6	+270	+140	+70	+46	+30	+20	+14	+10	+6	+4	0	+5	+6	+10	-1+Δ	0	-4+Δ	-4	-8+Δ	0	-12	-15	-19	--	-23	--	-28	--	-35	-42	-50	-80	1	1,5	1	3	4	6					
		> 6 à 10	+280	+150	+80	+56	+40	+25	+18	+13	+8	+5	0	+5	+8	+12	-1+Δ	0	-6+Δ	-6	-10+Δ	0	-15	-19	-23	--	-28	--	-34	--	-42	-52	-67	-97	1	1,5	2	3	6	7					
		> 10 à 14	+290	+150	+95	--	+50	+32	--	+16	--	+6	0	+6	+10	+15	-1+Δ	0	-7+Δ	-7	-12+Δ	0	-18	-23	-28	--	-33	--	-40	--	-50	-64	-90	-130	1	2	3	3	7	9					
		> 14 à 18	+290	+150	+95	--	+50	+32	--	+16	--	+6	0	+6	+10	+15	-1+Δ	0	-7+Δ	-7	-12+Δ	0	-18	-23	-28	--	-33	--	-39	-45	--	-60	-77	-108	-150	1,5	2	3	4	8	12				
		> 18 à 24	+300	+160	+110	--	+65	+40	--	+20	--	+7	0	+8	+12	+20	-2+Δ	0	-8+Δ	-8	-15+Δ	0	-22	-28	-35	--	-41	-47	-54	-68	-73	-98	-136	-188	1,5	2	3	4	8	12					
		> 24 à 30	+300	+160	+110	--	+65	+40	--	+20	--	+7	0	+8	+12	+20	-2+Δ	0	-8+Δ	-8	-15+Δ	0	-22	-28	-35	--	-41	-48	-55	-64	-75	-88	-118	-160	-218	1,5	2	3	4	8	12				
		> 30 à 40	+310	+170	+120	--	+80	+50	--	+25	--	+9	0	+10	+14	+24	-2+Δ	0	-9+Δ	-9	-17+Δ	0	-26	-34	-43	--	-48	-60	-63	-80	-94	-112	-148	-200	-274	1,5	3	4	5	9	14				
		> 40 à 50	+320	+180	+130	--	+100	+60	--	+30	--	+10	0	+13	+18	+28	-2+Δ	0	-11+Δ	-11	-20+Δ	0	-32	-41	-53	--	-66	-87	-102	-122	-144	-172	-226	-300	-405	2	3	5	6	11	16				
		> 50 à 65	+340	+190	+140	--	+120	+72	--	+36	--	+12	0	+16	+22	+34	-3+Δ	0	-13+Δ	-13	-23+Δ	0	-37	-43	-59	--	-75	-102	-120	-146	-174	-210	-274	-360	-480	2	4	5	7	13	19				
		> 65 à 80	+360	+200	+150	--	+140	+84	--	+42	--	+14	0	+18	+26	+41	-3+Δ	0	-15+Δ	-15	-27+Δ	0	-43	-51	-71	--	-91	-124	-146	-178	-214	-258	-335	-445	-585	2	4	5	7	13	19				
		> 80 à 100	+380	+220	+170	--	+160	+96	--	+48	--	+16	0	+22	+30	+47	-4+Δ	0	-17+Δ	-17	-31+Δ	0	-50	-54	-79	--	-104	-144	-172	-210	-254	-310	-400	-525	-690	3	4	6	7	15	23				
		> 100 à 120	+410	+240	+180	--	+180	+108	--	+54	--	+18	0	+25	+36	+55	-4+Δ	0	-19+Δ	-19	-34+Δ	0	-56	-63	-92	--	-122	-170	-202	-248	-300	-365	-470	-620	-800	3	4	6	7	15	23				
		> 120 à 140	+460	+260	+200	--	+200	+120	--	+60	--	+20	0	+28	+40	+61	-5+Δ	0	-21+Δ	-21	-37+Δ	0	-63	-77	-104	--	-144	-202	-248	-300	-365	-470	-620	-800	3	4	6	7	15	23					
		> 140 à 160	+520	+280	+210	--	+220	+132	--	+66	--	+22	0	+32	+44	+67	-6+Δ	0	-23+Δ	-23	-41+Δ	0	-77	-94	-122	--	-166	-236	-284	-350	-425	-520	-670	-880	-1150	3	4	6	9	17	26				
		> 160 à 180	+580	+310	+230	--	+240	+144	--	+72	--	+24	0	+36	+48	+73	-7+Δ	0	-25+Δ	-25	-43+Δ	0	-84	-104	-134	--	-180	-252	-304	-380	-460	-600	-780	-1000	3	4	6	9	17	26					
		> 180 à 200	+660	+340	+240	--	+260	+156	--	+78	--	+26	0	+40	+52	+79	-8+Δ	0																											

Assemblages arbre-moyeu

- Ajustements ISO

- Arbres : position du nominal : lettre minuscule + qualité (définit l'intervalle de tolérance)



Assemblages arbre-moyeu

- Calcul du frettage
 - Le calcul se fait de la façon suivante :
 - calcul de la pression p_{\min} et/ou la longueur de frettage L assurant la transmission des efforts
 - L est en général donné par la taille de la pièce à assembler et a été déterminée auparavant...
 - calcul du serrage permettant d'assurer p_{\min}
 - calcul de p_{\max} (limite de plastification)
 - avec les deux valeurs, calcul des **ajustements** (cotes de fabrication exactes des pièces non assemblées)
 - Enfin, choix de la technologie d'assemblage (presse pour de faibles écarts, dilatation thermique autrement)

Assemblages arbre-moyeu

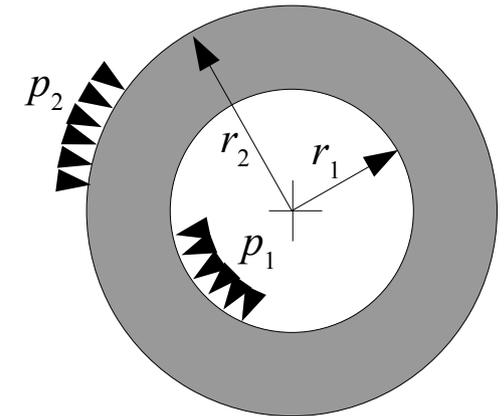
- Solution analytique d'un anneau en coordonnées cylindriques avec pression simple (rappel) :

Équations d'équilibre

$$\begin{cases} \frac{\sigma_t - \sigma_r}{r} - \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rt}}{\partial \theta} = 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_t}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rt}}{\partial r} + \frac{2\tau_{rt}}{r} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \nu \frac{u}{r} \right) \\ \sigma_t = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right) \\ \tau_{rt} = 0 \end{cases}$$

$$\longrightarrow \sigma_t - \sigma_r - r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = 0 \quad \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} = 0$$

$$u(r) = C_1 r + C_2 \frac{1}{r} \quad \text{Solution générale pour les déplacements}$$



- Conditions aux limites

$$\begin{cases} \sigma_r(r_1) = -p_1 \\ \sigma_r(r_2) = -p_2 \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} C_1 = \frac{1-\nu}{E} \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \\ C_2 = \frac{1+\nu}{E} \frac{(p_1 - p_2) r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \end{cases}$$

$$u(r) = \frac{1-\nu}{E} \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} r + \frac{1+\nu}{E} \frac{(p_1 - p_2) r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r}$$

Assemblages arbre-moyeu

$$u(r) = \frac{1-\nu}{E} \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} r + \frac{1+\nu}{E} \frac{(p_1 - p_2) r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r}$$

- En contraintes cela donne :

$$\sigma_r(r) = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \nu \frac{u}{r} \right)$$

$$\sigma_t(r) = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right)$$

$$\sigma_r(r) = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_1 - p_2) r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r^2}$$

$$\sigma_t(r) = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r^2}$$

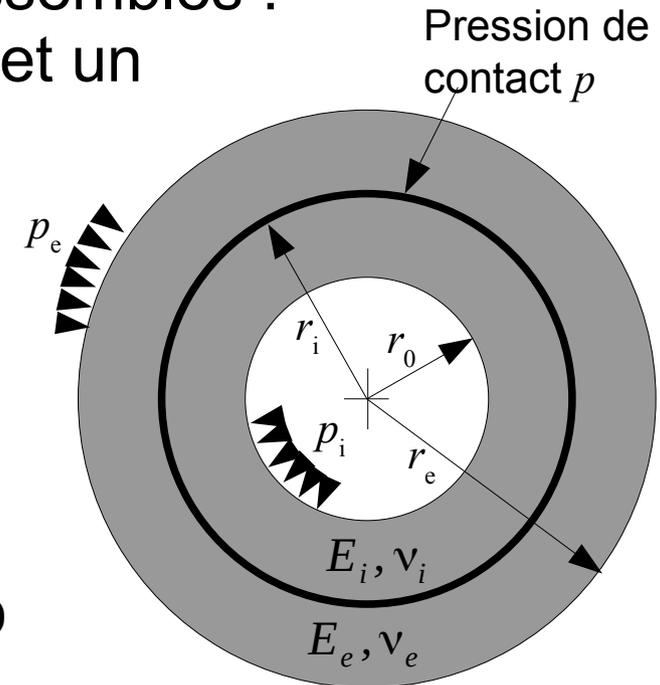
Assemblages arbre-moyeu

- Cas du frettage entre deux cylindres assemblés : un arbre intérieur, possiblement creux, et un moyeu externe.

- Nous devons établir la relation entre le serrage géométrique en r_i et la pression de contact p
- Dans notre cas, p_i et p_e sont nuls, et seule la pression de contact p à l'interface est à considérer.
- Calculons les contraintes en chaque interface :
 $r=r_e$ (moyeu e) : conditions aux limites $p_1=p$, $p_2=0$
 $r=r_i$ (moyeu e) : C.L. $p_1=p$, $p_2=0$
 $r=r_i$ (arbre i) : C.L. $p_1=0$, $p_2=p$
 $r=r_0$ (arbre i) : C.L. $p_1=0$, $p_2=p$

$$\sigma_r = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_1 - p_2) r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r^2}$$

$$\sigma_t = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r^2}$$



Assemblages arbre-moyeu

- $r=r_e$ (moyeu e) : $p_1=p$, $p_2=0$

$$\sigma_r = p \left(\frac{r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} - \frac{r_i^2 r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} \frac{1}{r_e^2} \right) = 0$$

$$\sigma_t = p \left(\frac{r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} + \frac{r_i^2 r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} \frac{1}{r_e^2} \right) = 2p \frac{r_i^2}{r_e^2 - r_i^2}$$

- $r=r_i$ (moyeu e) : $p_1=p$, $p_2=0$

$$\sigma_r = p \left(\frac{r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} - \frac{r_i^2 r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} \frac{1}{r_i^2} \right) = -p$$

$$\sigma_t = p \left(\frac{r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} + \frac{r_i^2 r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} \frac{1}{r_i^2} \right) = p \frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2}$$

Assemblages arbre-moyeu

- $r=r_i$ (arbre i) : $p_1=0$, $p_2=p$

$$\sigma_r = -p \left(\frac{r_i^2}{r_i^2 - r_0^2} - \frac{r_i^2 r_0^2}{r_i^2 - r_0^2} \frac{1}{r_i^2} \right) = -p$$

$$\sigma_t = -p \left(\frac{r_i^2}{r_i^2 - r_0^2} + \frac{r_i^2 r_0^2}{r_i^2 - r_0^2} \frac{1}{r_i^2} \right) = -p \frac{r_i^2 + r_0^2}{r_i^2 - r_0^2}$$

- $r=r_0$ (arbre i) : $p_1=0$, $p_2=p$

$$\sigma_r = -p \left(\frac{r_i^2}{r_i^2 - r_0^2} - \frac{r_i^2 r_0^2}{r_i^2 - r_0^2} \frac{1}{r_0^2} \right) = 0$$

$$\sigma_t = -p \left(\frac{r_i^2}{r_i^2 - r_0^2} + \frac{r_i^2 r_0^2}{r_i^2 - r_0^2} \frac{1}{r_0^2} \right) = -2p \frac{r_i^2}{r_i^2 - r_0^2}$$

Attention : si $r_0=0$: état de contraintes de type **hydrostatique** dans l'arbre plein !

$$\sigma_r = -p$$

$$\sigma_t = -p$$

Assemblages arbre-moyeu

- Exprimons maintenant que la différence de rayon r_{ie} et r_{i0} au niveau de l'interface vaut la somme des dilatations u_{ie} / contractions u_{i0}

$$u(r) = \frac{1-\nu}{E} \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} r + \frac{1+\nu}{E} \frac{(p_1 - p_2) r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r}$$

$$u_{ie} = p \frac{r_i}{E_e} \left(\frac{r_i^2 + r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} + \nu_e \right)$$

$$u_{i0} = -p \frac{r_i}{E_i} \left(\frac{r_i^2 + r_0^2}{r_i^2 - r_0^2} - \nu_i \right)$$

- l'écart vaut donc :

$$\delta u_i = p \frac{r_i}{E_e} \left(\frac{r_i^2 + r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} + \nu_e \right) + p \frac{r_i}{E_i} \left(\frac{r_i^2 + r_0^2}{r_i^2 - r_0^2} - \nu_i \right)$$

- En termes de diamètre, on a donc ...

$$\delta d_i = p \frac{d_i}{E_e} \left(\frac{d_i^2 + d_e^2}{d_e^2 - d_i^2} + \nu_e \right) + p \frac{d_i}{E_i} \left(\frac{d_i^2 + d_0^2}{d_i^2 - d_0^2} - \nu_i \right)$$

Assemblages arbre-moyeu

$$\delta d_i = p \frac{d_i}{E_e} \left(\frac{d_i^2 + d_e^2}{d_e^2 - d_i^2} + \nu_e \right) + p \frac{d_i}{E_i} \left(\frac{d_i^2 + d_0^2}{d_i^2 - d_0^2} - \nu_i \right)$$

- Cas particulier : arbre plein ($d_0 \rightarrow 0$) et frette de matériau identique, formule simplifiée :

$$\delta d_i = p \frac{d_i}{E} \left(\frac{d_i^2 + d_e^2}{d_e^2 - d_i^2} + 1 \right)$$

- Détermination de l'ajustement optimal

- Le serrage effectif doit être
 - **supérieur** au serrage minimal pour assurer la fonction de blocage
 - **inférieur** (en principe) au serrage maximal pour éviter la plastification - mais on peut imaginer un assemblage (indémontable) pour lequel ce n'est pas vérifié, e.g. pour des assemblages très sollicités. Les calculs qui suivent ne l'envisagent pas.

Assemblages arbre-moyeu

- Calcul du serrage minimum

- Couple C_t : si la puissance à transmettre est connue, ainsi que la vitesse de rotation par exemple. Sinon, déterminer le couple en fonction du diamètre de l'arbre utilisé.
- En général on prend un coefficient de sécurité car le fonctionnement est rarement sans à-coups (eg. moteurs à pistons).

$$C_f = s \cdot C_t \quad s \in [1.4 - 2]$$

- On exprime le non glissement de la surface de contact dont l'aire est donnée par :

$$A = L \pi d_i$$

la force développée par le couple en r_i est

$$F = 2 \frac{C_f}{d_i}$$

Cette force doit être inférieure à $F_{\max} = A f p$, $f \sim 0.2$ étant le coefficient de friction

- D'où : $p_{\min} = \frac{2 C_f}{f L \pi d_i^2}$

Assemblages arbre-moyeu

$$p_{min} = \frac{2C_f}{f L \pi d_i^2}$$

- Calcul de l'interférence nécessaires pour assurer p_{min} :

- On utilise les formules établies : (Arbre plein et matériaux identiques)

$$\delta d_i = p \frac{d_i}{E_e} \left(\frac{d_i^2 + d_e^2}{d_e^2 - d_i^2} + \nu_e \right) + p \frac{d_i}{E_i} \left(\frac{d_i^2 + d_0^2}{d_i^2 - d_0^2} - \nu_i \right) \qquad \delta d_i = p \frac{d_i}{E} \left(\frac{d_i^2 + d_e^2}{d_e^2 - d_i^2} + 1 \right)$$

- Ces formules donnent le serrage minimum apparent qu'il faudrait adopter si l'emmanchement ne perturbait pas les surfaces. En pratique, les éléments sont caractérisés par une rugosité R_a , : la pression de contact va en fait écraser le relief dû à la rugosité, et le serrage réel sera inférieur à celui prévu
 - On considère que $\delta d_i^{\text{effectif}} = \delta d_i - 2(R_a^e + R_a^i)$

$$\text{d'où : } \delta d_i^{\min} = \frac{2C_f}{f L \pi d_i^2} \left(\frac{d_i}{E_e} \left(\frac{d_i^2 + d_e^2}{d_e^2 - d_i^2} + \nu_e \right) + \frac{d_i}{E_i} \left(\frac{d_i^2 + d_0^2}{d_i^2 - d_0^2} - \nu_i \right) \right) + 2(R_a^e + R_a^i)$$

Assemblages arbre-moyeu

- Rugosités typiques

Ra max (µm)	Rugosité ISO	Types de procédés
200	-	coulage en sable, oxycoupage grossier, découpe plasma grossier
100	-	coulage en sable, coulage en coquille grossier, oxycoupage grossier, découpe plasma grossier, sablage grossier
50	N12	coulage en sable, coulage en carapace grossier, coulage en coquille, coulage sous pression grossier, forgeage en matrice grossier, laminage à chaud grossier, pressage grossier, oxycoupage, découpe plasma grossier, découpe laser grossier, découpe jet d'eau grossier, sciage grossier, étampage grossier, sablage, grenailage, rabotage grossier, perçage grossier, mortaisage grossier
25	N11	coulage en sable fin, coulage en carapace, coulage en coquille, coulage sous pression, forgeage en matrice, laminage à chaud, pressage, oxycoupage, découpe plasma, découpe laser grossier, découpe jet d'eau grossier, sciage, tronçonnage à la meule grossier, étampage grossier, sablage, grenailage, grenailage aux billes grossier, tournage frontal/périphérique grossier, rabotage, mortaisage
12.5	N10	coulage en carapace, coulage en coquille, coulage de précision, coulage sous pression, forgeage en matrice, laminage à chaud, pressage, extrusion grossière, oxycoupage fin, découpe plasma, découpe laser, découpe au jet d'eau, sciage, tronçonnage à la meule, étampage, sablage, grenailage, grenailage aux billes, tournage frontal/périphérique, rabotage, mortaisage, alaisage grossier, lamage grossier, fraisage grossier

Assemblages arbre-moyeu

- Rugosités typiques

Ra max (µm)	Rugosité ISO	Types de procédés
6.3	N9	coulage en carapace, coulage en coquille, coulage de précision, coulage sous pression, forgeage en matrice fin, laminage à chaud fin, laminage à froid grossier, pressage, extrusion grossier, étirage à froid grossier, découpe plasma fin, découpe laser, découpe jet d'eau, sciage fin, tronçonnage à la meule fin, étampage, sablage fin, grenailage fin, grenailage aux billes, tournage frontal/périphérique, rabotage, perçage, mortaisage, alésage, lamage, fraisage, rectification frontale grossière
3.2	N8	coulage en carapace fin, coulage en coquille fin, coulage de précision, coulage sous pression, laminage à froid, pressage, extrusion, étirage à froid, découpe plasma fin, découpe laser fin, découpe jet d'eau fin, électroérosion à fil grossier, étampage fin, sablage fin, grenailage fin, grenailage aux billes fin, tournage, rabotage fin, perçage fin, mortaisage fin, alaisage, lamage, fraisage, brochage grossier, grattage grossier, rectification en périphérie grossière, planage à la meule grossier, rectification frontale, honage grossier
1.6	N7	coulage en coquille fin, coulage de précision fin, coulage sous pression fin, laminage à froid, pressage fin, extrusion, étirage à froid, découpe plasma fin, découpe laser fin, découpe jet d'eau fin, électroérosion à fil grossier, étampage fin, grenailage aux billes fin, tournage fin, tournage au diamant grossier, rabotage fin, perçage fin, alésage fin, lamage fin, fraisage, brochage, grattage, rectification périphérique, planage à la meule, rectification frontale, honage grossier
0.8	N6	laminage à froid fin, extrusion fine, étirage à froid, électroérosion au fil, tournage au diamant, alésage fin, fraisage fin, brochage, grattage, rectification périphérique, planage à la meule, rectification frontale, honage, polissage grossier

Assemblages arbre-moyeu

- Rugosités typiques

Ra max (µm)	Rugosité ISO	Types de procédés
0.4	N5	étirage à froid fin, électroérosion au fil, tournage au diamant, brochage fin, grattage fin, rectification périphérique, planage à la meule fin, rectification frontale fine, polissage à la meule grossier, honage, polissage
0.2	N4	brunissage grossier, électroérosion au fil, tournage au diamant fin, rectification périphérique fine, planage à la meule fin, polissage à la meule, honage, polissage
0.1	N3	brunissage, électroérosion au fil fin, rectification périphérique fine, polissage à la meule, honage fin, polissage
0.05	N2	brunissage, électroérosion au fil fin, polissage à la meule fin, polissage fin
0.025	N1	brunissage fin, polissage fin

Assemblages arbre-moyeu

- Calcul de l'interférence maximale pour éviter tout endommagement (on reste dans le domaine élastique !)
 - Il faut évaluer les contraintes : elles sont maximales en r_0 , r_i ou r_e .
 - En r_e , l'évaluation des contraintes est compliquée car il s'agit en général d'une surface active (engrenages etc.), dont les règles de calcul sont spécifiques. Si la frette est d'épaisseur raisonnable, les efforts dus au frettage sont d'ailleurs minimes en regard des efforts de contact (par exemple). Ce cas n'est donc pas évalué ici.
 - Pour les autres rayons, l'état de contrainte est tridimensionnel : aux contraintes dues au frettage s'ajoutent celles dues à l'ensemble de l'assemblage (e.g. flexion de l'arbre)
 - On va donc évaluer les contraintes principales, ce qui reste simple car les lignes d'action des efforts sont clairement définies et perpendiculaires.
 - On ne tient pas compte du cisaillement (effort tranchant) !

Assemblages arbre-moyeu

- $r=r_i$ (moyeu e) : $\sigma_r = -p$ $\sigma_t = p \frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2}$

$\sigma_1 = \sigma_t = p \frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2}$

$\sigma_2 = \sigma_r = -p$

$\sigma_3 = 0$
- $r=r_i$ (arbre i) : $\sigma_r = -p$ $\sigma_t = -p \frac{r_i^2 + r_0^2}{r_i^2 - r_0^2}$

$\sigma_1 = \sigma_t = -p \frac{r_i^2 + r_0^2}{r_i^2 - r_0^2}$

$\sigma_2 = \sigma_r = -p$

$\sigma_3 = \sigma_{\text{axiale}}$
- $r=r_0$ (arbre i) : $\sigma_r = 0$ (ou $-p$) $\sigma_t = -2p \frac{r_i^2}{r_i^2 - r_0^2}$ (ou $-p$)

$\sigma_1 = \sigma_t$

$\sigma_2 = \sigma_r$

$\sigma_3 = \sigma_{\text{axiale}}$

Assemblages arbre-moyeu

- Prenons le cas d'aciers (ductiles), avec le critère de Tresca. Il faut simplement déterminer le max de l'écart entre contraintes principales. On compare alors avec R , limite d'élasticité.
- $r=r_i$ (moyeu e) : $\sigma_1 = \sigma_t = p \frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2}$ $\sigma_2 = \sigma_r = -p$ $\sigma_3 = 0$

$$\sigma_c = \sigma_1 - \sigma_2 = p \left(1 + \frac{r_e^2 + r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} \right)$$

$$p_{\max}^1 = R \frac{r_e^2 - r_i^2}{2r_e^2}$$
- $r=r_i$ (arbre i) : $\sigma_1 = \sigma_t = -p \frac{r_i^2 + r_0^2}{r_i^2 - r_0^2}$ $\sigma_2 = \sigma_r = -p$ $\sigma_3 = \sigma_{\text{axiale}}$

$$\sigma_c = \sigma_3 - \sigma_1 = \sigma_{\text{axiale}} + p \left(\frac{r_i^2 + r_0^2}{r_i^2 - r_0^2} \right)$$

$$p_{\max}^2 = (R - \sigma_{\text{axiale}}) \frac{r_i^2 - r_0^2}{r_i^2 + r_0^2}$$
- $r=r_0$ (arbre i) : $\sigma_1 = -2p \frac{r_i^2}{r_i^2 - r_0^2}$ (ou $-p$) $\sigma_2 = 0$ (ou $-p$) $\sigma_3 = \sigma_{\text{axiale}}$

$$\sigma_c = \sigma_3 - \sigma_1 = \sigma_{\text{axiale}} + 2p \frac{r_i^2}{r_i^2 - r_0^2}$$
 (ou $\sigma_{\text{axiale}} + p$)
$$p_{\max}^3 = (R - \sigma_{\text{axiale}}) \frac{r_i^2 - r_0^2}{2r_i^2}$$

(ou $p_{\max}^3 = R - \sigma_{\text{axiale}}$)

Assemblages arbre-moyeu

- On prend bien entendu le minimum des trois valeurs

$$p_{\max} = \min(p_{\max}^1, p_{\max}^2, p_{\max}^3)$$

$$p_{\max}^1 = R \frac{r_e^2 - r_i^2}{2r_e^2}$$

$$p_{\max}^2 = (R - \sigma_{\text{axiale}}) \frac{r_i^2 - r_0^2}{r_i^2 + r_0^2}$$

$$p_{\max}^3 = (R - \sigma_{\text{axiale}}) \frac{r_i^2 - r_0^2}{2r_i^2}$$

(ou $p_{\max}^3 = R - \sigma_{\text{axiale}}$)

- Il faut maintenant déterminer le serrage correspondant !
- On l'a déjà fait pour p_{\min} , or la proportionnalité de la relation force-déplacement nous permet de calculer le serrage correspondant à p_{\max} directement :

$$\delta d_i^{\max} = \left(\delta d_i^{\min} - 2(R_a^e + R_a^i) \right) \frac{p_{\max}}{p_{\min}}$$

(on ne rajoute pas à nouveau $2(R_a^e + R_a^i)$ pour être conservatif ...)

- Avec les valeurs de δd_i^{\min} et δd_i^{\max} , on peut alors déterminer l'ajustement ISO qui figurera sur un plan...

Assemblages arbre-moyeu

$$d_{\max}^{\text{arbre}} = d_{\text{nom}} + \delta d_{i,\text{calculé}}^{\max}$$

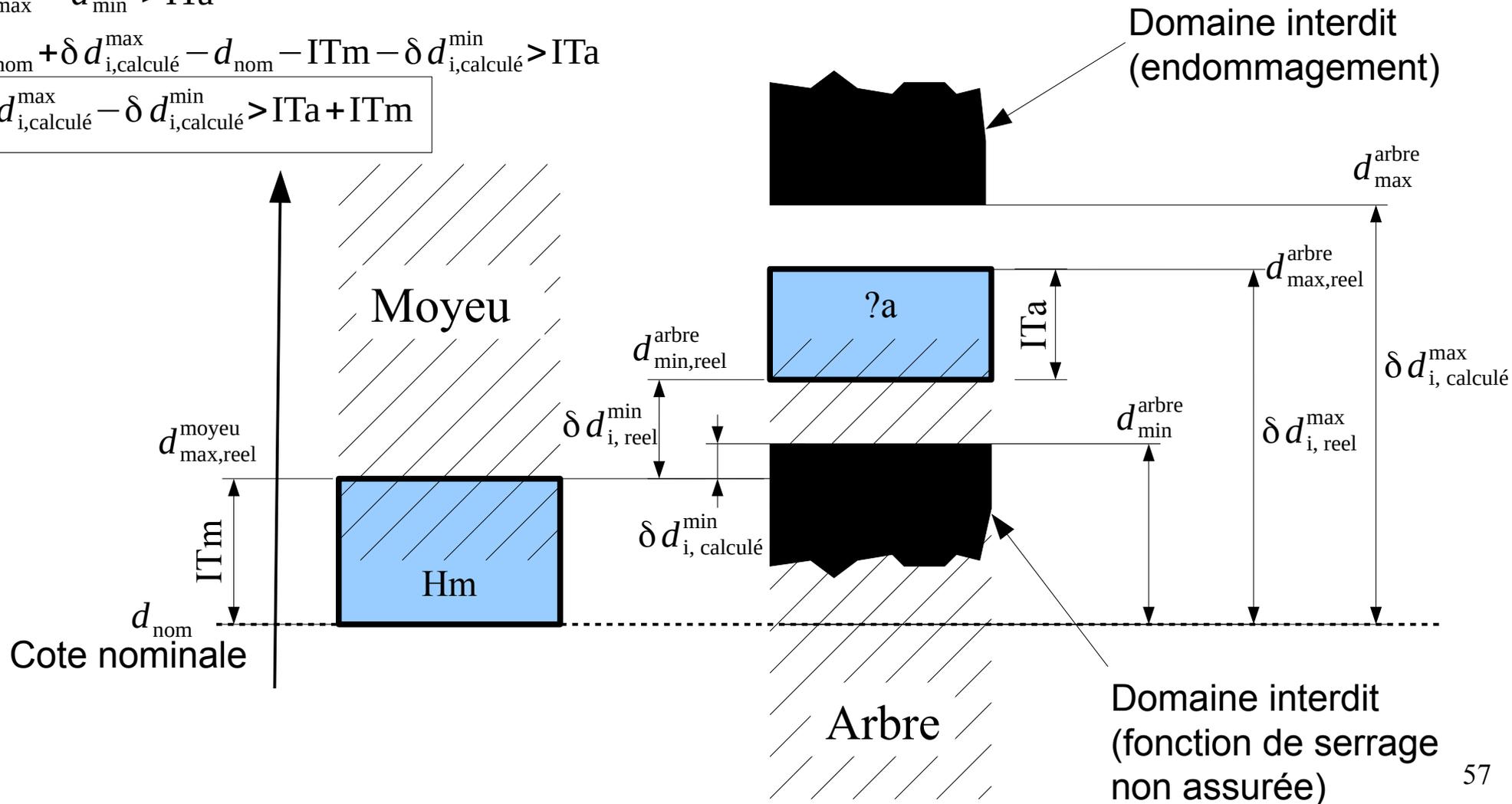
$$d_{\min}^{\text{arbre}} = d_{\text{nom}} + ITm + \delta d_{i,\text{calculé}}^{\min}$$

$$d_{\max}^{\text{arbre}} - d_{\min}^{\text{arbre}} > ITa$$

$$d_{\text{nom}} + \delta d_{i,\text{calculé}}^{\max} - d_{\text{nom}} - ITm - \delta d_{i,\text{calculé}}^{\min} > ITa$$

$$\delta d_{i,\text{calculé}}^{\max} - \delta d_{i,\text{calculé}}^{\min} > ITa + ITm$$

■ Cas de l'alésage normal



Assemblages arbre-moyeu

- Procédure résumée (alésage normal) :

- En pratique, on se place soit dans le cas d'un alésage normal (écart avec la cote nominale nul au maximum de matière), soit dans le cas d'un arbre normal (idem)
- On calcule alors les δd_i^{\min} et δd_i^{\max} et on corrige l'élément non normal.
- On doit généralement calculer un intervalle de tolérance satisfaisant toutes les contraintes :

$$IT^{\text{arbre}} + IT^{\text{moyeu}} < \delta d_{i,\text{calculé}}^{\max} - \delta d_{i,\text{calculé}}^{\min}$$

➔ On choisit généralement $Q^{\text{arbre}} = Q^{\text{moyeu}} - 1$

- Pour un alésage normal (H), on choisit l'ajustement de l'arbre tel que l'écart minimum est supérieur à δd_i^{\min} , soit une lettre (minuscule) de rang supérieur à h (k, l , ...) (ou lettre (majuscule) de rang supérieur à H(K, L , M ...) pour l'alésage si on a un arbre normal !)
- Si l'IT de l'arbre implique que $d_{\max}^{\text{arbre}} > \delta d_i^{\max}$ on doit revoir le choix de la qualité de l'arbre (Q vers le haut → indice diminue, 7 vers 6 par exemple).

Note : **On ne prend en principe pas la même qualité pour l'arbre et pour le moyeu, et l'arbre est de qualité supérieure (plus facile à réaliser que l'inverse)**

- On obtient alors l'ajustement complet ; par exemple H7/p6 et on indiquera $\varnothing 30H7$ et $\varnothing 30p6$ sur le plan, respectivement pour l'alésage et l'arbre.

Assemblages arbre-moyeu

- Intervalles de tolérances IT – ajustements ISO

paliers de dimensions en mm	qualités																		
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14*	15*	16*	
	≤3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600
> 3 à	6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
> 6 à	10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
> 10 à	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100
> 18 à	30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300
> 30 à	50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600
> 50 à	80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900
> 80 à	120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200
> 120 à	180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500
> 180 à	250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900
> 250 à	315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200
> 315 à	400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600
> 400 à	500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000
tolérances fondamentales en microns																			
* les qualités 14, 15, 16 ne sont prévues qu'au-delà de 1 mm																			

Ecarts fondamentaux des arbres

Guide pratique d'utilisation

Symbole	Ecart fondamental												Ecart supérieur es											Ecart inférieur ei																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	Lettre	a*	b*	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js	j			k			m		n		p		r		s		t		u		v		x		y		z		za	zb	zc																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Qualité	Toutes qualités											Toutes qualités																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Ecarts fondamentaux en microns	paliers de dimensions nominales en millimètres	* <3	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14	+19	+23	+28	+33	+39	+45	+51	+57	+63	+70	+77	+84	+91	+98	+105	+112	+120	+127	+135	+142	+150	+157	+165	+172	+180	+187	+195	+202	+210	+217	+225	+232	+240	+247	+255	+262	+270	+277	+285	+292	+300	+307	+315	+322	+330	+337	+345	+352	+360	+367	+375	+382	+390	+397	+405	+412	+420	+427	+435	+442	+450	+457	+465	+472	+480	+487	+495	+502	+510	+517	+525	+532	+540	+547	+555	+562	+570	+577	+585	+592	+600	+607	+615	+622	+630	+637	+645	+652	+660	+667	+675	+682	+690	+697	+705	+712	+720	+727	+735	+742	+750	+757	+765	+772	+780	+787	+795	+802	+810	+817	+825	+832	+840	+847	+855	+862	+870	+877	+885	+892	+900	+907	+915	+922	+930	+937	+945	+952	+960	+967	+975	+982	+990	+997	+1005	+1012	+1020	+1027	+1035	+1042	+1050	+1057	+1065	+1072	+1080	+1087	+1095	+1102	+1110	+1117	+1125	+1132	+1140	+1147	+1155	+1162	+1170	+1177	+1185	+1192	+1200	+1207	+1215	+1222	+1230	+1237	+1245	+1252	+1260	+1267	+1275	+1282	+1290	+1297	+1305	+1312	+1320	+1327	+1335	+1342	+1350	+1357	+1365	+1372	+1380	+1387	+1395	+1402	+1410	+1417	+1425	+1432	+1440	+1447	+1455	+1462	+1470	+1477	+1485	+1492	+1500	+1507	+1515	+1522	+1530	+1537	+1545	+1552	+1560	+1567	+1575	+1582	+1590	+1597	+1605	+1612	+1620	+1627	+1635	+1642	+1650	+1657	+1665	+1672	+1680	+1687	+1695	+1702	+1710	+1717	+1725	+1732	+1740	+1747	+1755	+1762	+1770	+1777	+1785	+1792	+1800	+1807	+1815	+1822	+1830	+1837	+1845	+1852	+1860	+1867	+1875	+1882	+1890	+1897	+1905	+1912	+1920	+1927	+1935	+1942	+1950	+1957	+1965	+1972	+1980	+1987	+1995	+2002	+2010	+2017	+2025	+2032	+2040	+2047	+2055	+2062	+2070	+2077	+2085	+2092	+2100	+2107	+2115	+2122	+2130	+2137	+2145	+2152	+2160	+2167	+2175	+2182	+2190	+2197	+2205	+2212	+2220	+2227	+2235	+2242	+2250	+2257	+2265	+2272	+2280	+2287	+2295	+2302	+2310	+2317	+2325	+2332	+2340	+2347	+2355	+2362	+2370	+2377	+2385	+2392	+2400	+2407	+2415	+2422	+2430	+2437	+2445	+2452	+2460	+2467	+2475	+2482	+2490	+2497	+2505	+2512	+2520	+2527	+2535	+2542	+2550	+2557	+2565	+2572	+2580	+2587	+2595	+2602	+2610	+2617	+2625	+2632	+2640	+2647	+2655	+2662	+2670	+2677	+2685	+2692	+2700	+2707	+2715	+2722	+2730	+2737	+2745	+2752	+2760	+2767	+2775	+2782	+2790	+2797	+2805	+2812	+2820	+2827	+2835	+2842	+2850	+2857	+2865	+2872	+2880	+2887	+2895	+2902	+2910	+2917	+2925	+2932	+2940	+2947	+2955	+2962	+2970	+2977	+2985	+2992	+3000	+3007	+3015	+3022	+3030	+3037	+3045	+3052	+3060	+3067	+3075	+3082	+3090	+3097	+3105	+3112	+3120	+3127	+3135	+3142	+3150	+3157	+3165	+3172	+3180	+3187	+3195	+3202	+3210	+3217	+3225	+3232	+3240	+3247	+3255	+3262	+3270	+3277	+3285	+3292	+3300	+3307	+3315	+3322	+3330	+3337	+3345	+3352	+3360	+3367	+3375	+3382	+3390	+3397	+3405	+3412	+3420	+3427	+3435	+3442	+3450	+3457	+3465	+3472	+3480	+3487	+3495	+3502	+3510	+3517	+3525	+3532	+3540	+3547	+3555	+3562	+3570	+3577	+3585	+3592	+3600	+3607	+3615	+3622	+3630	+3637	+3645	+3652	+3660	+3667	+3675	+3682	+3690	+3697	+3705	+3712	+3720	+3727	+3735	+3742	+3750	+3757	+3765	+3772	+3780	+3787	+3795	+3802	+3810	+3817	+3825	+3832	+3840	+3847	+3855	+3862	+3870	+3877	+3885	+3892	+3900	+3907	+3915	+3922	+3930	+3937	+3945	+3952	+3960	+3967	+3975	+3982	+3990	+3997	+4005	+4012	+4020	+4027	+4035	+4042	+4050	+4057	+4065	+4072	+4080	+4087	+4095	+4102	+4110	+4117	+4125	+4132	+4140	+4147	+4155	+4162	+4170	+4177	+4185	+4192	+4200	+4207	+4215	+4222	+4230	+4237	+4245	+4252	+4260	+4267	+4275	+4282	+4290	+4297	+4305	+4312	+4320	+4327	+4335	+4342	+4350	+4357	+4365	+4372	+4380	+4387	+4395	+4402	+4410	+4417	+4425	+4432	+4440	+4447	+4455	+4462	+4470	+4477	+4485	+4492	+4500	+4507	+4515	+4522	+4530	+4537	+4545	+4552	+4560	+4567	+4575	+4582	+4590	+4597	+4605	+4612	+4620	+4627	+4635	+4642	+4650	+4657	+4665	+4672	+4680	+4687	+4695	+4702	+4710	+4717	+4725	+4732	+4740	+4747	+4755	+4762	+4770	+4777	+4785	+4792	+4800	+4807	+4815	+4822	+4830	+4837	+4845	+4852	+4860	+4867	+4875	+4882	+4890	+4897	+4905	+4912	+4920	+4927	+4935	+4942	+4950	+4957	+4965	+4972	+4980	+4987	+4995	+5002	+5010	+5017	+5025	+5032	+5040	+5047	+5055	+5062	+5070	+5077	+5085	+5092	+5100	+5107	+5115	+5122	+5130	+5137	+5145	+5152	+5160	+5167	+5175	+5182	+5190	+5197	+5205	+5212	+5220	+5227	+5235	+5242	+5250	+5257	+5265	+5272	+5280	+5287	+5295	+5302	+5310	+5317	+5325	+5332	+5340	+5347	+5355	+5362	+5370	+5377	+5385	+5392	+5400	+5407	+5415	+5422	+5430	+5437	+5445	+5452	+5460	+5467	+5475	+5482	+5490	+5497	+5505	+5512	+5520	+5527	+5535	+5542	+5550	+5557	+5565	+5572	+5580	+5587	+5595	+5602	+5610	+5617	+5625	+5632	+5640	+5647	+5655	+5662	+5670	+5677	+5685	+5692	+5700	+5707	+5715	+5722	+5730	+5737	+5745	+5752	+5760	+5767	+5775	+5782	+5790	+5797	+5805	+5812	+5820	+5827	+5835	+5842	+5850	+5857	+5865	+5872	+5880	+5887	+5895	+5902	+5910	+5917	+5925	+5932	+5940	+5947	+5955	+5962	+5970	+5977	+5985	+5992	+6000	+6007	+6015	+6022	+6030	+6037	+6045	+6052	+6060	+6067	+6075	+6082	+6090	+6097	+6105	+6112	+6120	+6127	+6135	+6142	+6150	+6157	+6165	+6172	+6180	+6187	+6195	+6202	+6210	+6217	+6225	+6232	+6240	+6247	+6255	+6262	+6270	+6277	+6285	+6292	+6300	+6307	+6315	+6322	+6330	+6337	+6345	+6352	+6360	+6367	+6375	+6382	+6390	+6397	+6405	+6412	+6420	+6427	+6435	+6442	+6450	+6457	+6465	+6472	+6480	+6487	+6495	+6502	+6510	+6517	+6525	+6532	+6540	+6547	+6555	+6562	+6570	+6577	+6585	+6592	+6600	+6607	+6615	+6622	+6630	+6637	+6645	+6652	+6660	+6667	+6675	+6682	+6690	+6697	+6705	+6712	+6720	+6727	+6735	+6742	+6750	+6757	+6765	+6772	+6780	+6787	+6795	+6802	+6810	+6817	+6825	+6832	+6840	+6847	+6855	+6862	+6870	+6877	+6885	+6892	+6900	+6907	+6915	+6922	+6930	+6937	+6945	+6952	+6960	+6967	+6975	+6982	+6990	+6997	+7005	+7012	+7020	+7027	+7035	+7042	+7050	+7057	+7065	+7072	+7080	+7087	+7095	+7102	+7110	+7117	+7125	+7132	+7140	+7147	+7155	+7162	+7170	+7177	+7185	+7192	+7200	+7207	+7215	+7222	+7230	+7237	+7245	+7252	+7260	+7267	+7275	+7282	+7290	+7297	+7305	+7312	+7320	+7327	+7335	+7342	+7350	+7357	+7365	+7372	+7380	+7387	+7395	+7402	+7410	+7417	+7425	+7432	+7440	+7447	+7455	+7462	+7470	+7477	+7485	+7492	+7500	+7507	+7515	+7522	+7530	+7537	+7545	+7552	+7560	+7567	+7575	+7582	+7590	+7597	+7605	+7612	+7620	+7627	+7635	+7642	+7650	+7657	+7665	+7672	+7680	+7687	+7695	+7702	+7710	+7717	+7725	+7732	+7740	+7747	+7755	+7762	+7770	+7777	+7785	+7792	+7800	+7807	+7815	+7822	+7830	+7837	+7845	+7852	+7860	+7867	+7875	+7882	+7890	+7897	+7905	+7912	+7920	+7927	+7935	+7942	+7950	+7957	+7965	+7972	+7980	+7987	+7995	+8002	+8010	+8017	+8025	+8032	+8040	+8047	+8055	+8062	+8070	+8077	+8085	+8092	+8100	+8107	+8115	+8122	+8130	+8137	+8145	+8152	+8160	+8167	+8175	+8182	+8190	+8197	+8205	+8212	+8220	+8227	+8235	+8242	+8250	+8257	+8265	+8272	+8280	+8287	+8295	+8302	+8310	+8317	+8325	+8332	+8340	+8347	+8355	+8362	+8370	+8377	+8385	+8392	+8400	+8407	+8415	+8422	+8430	+8437	+8445	+8452	+8460	+8467	+8475	+8482	+8490	+8497	+8505	+8512	+8520	+8527	+8535	+8542	+8550	+8557	+8565	+8572	+8580	+8587	+8595	+8602	+8610	+8617	+8625	+8632	+8640	+8647	+8655	+8662	+8670	+8677	+8685	+8692	+8700	+8707	+8715	+8722	+8730	+8737	+8745	+8752	+8760	+8767	+8775	+8782	+8790	+8797	+8805	+8812	+8820	+8827	+8835	+8842	+8850	+8857	+8865	+8872	+8880	+8887	+8895	+8902	+8910	+8917	+8925	+8932	+8940	+8947	+8955	+8962	+8970	+8977	+8985	+8992	+9000	+9007	+9015	+9022	+9030	+9037	+9045	+9052	+9060	+9067	+9075	+9082	+9090	+9097	+9105	+9112	+9120	+9127	+9135	+9142	+9150	+9157	+9165	+9172	+9180	+9187	+9195	+9202	+9210	+9217	+9225	+9232	+9240	+9247	+9255	+9262	+9270	+9277	+9285	+9292	+9300	+9307	+9315	+9322	+9330	+9337	+9345	+9352	+9360	+9367	+9375	+9382	+9390	+9397	+9405	+9412	+9420	+9427	+9435	+9442	+9450	+9457	+9465	+9472	+9480	+9487	+9495	+9502	+9510	+9517	+9525	+9532	+9540	+9547	+9555	+9562	+9570	+9577	+9585	+9592	+9600	+9607	+9615	+9622	+9630	+9637	+9645	+9652	+9660	+9667	+9675	+9682	+9690	+9697	+9705	+9712	+9720	+9727	+9735	+9742	+9750	+9757	+9765	+9772	+9780	+9787	+9795	+9802	+9810	+9817	+9825	+9832	+9840	+9847	+9855	+9862	+9870	+9877	+9885	+9892	+9900	+99

Assemblages arbre-moyeu

- Mise en place de la frette
 - À la presse
 - Vérifier que les efforts ne sont pas trop importants, et que l'état de surface des zones de contact ne soient pas dégradés (par brochage)
 - Par dilatation thermique
 - Bain d'eau bouillante, d'huile, au chalumeau, chauffage par induction (moyeu)
 - Refroidissement par eau glacée, glace carbonique ou azote liquide (arbre)
 - Combinaison chauffage – refroidissement
- Démontage
 - Avec un arrache-moyeu : difficile sans destruction de l'interface si fort serrage.
 - Parfois possible par chauffage de la frette et si l'arbre est creux, on peut le refroidir par circulation d'un fluide.
 - **L'assemblage par frettage, sauf cas particuliers, n'est pas considéré comme « normalement » démontable.**

Assemblages arbre-moyeu

- Mise en place de la frette à la presse

- Il est capital d'avoir un bon état de surface et une rugosité faible, en pratique au maximum RA 1.6 , pour éviter le « brochage » d'une surface par les aspérités de l'autre, diminuant ainsi la qualité du frettage.

On doit utiliser l'écart maximal pour évaluer l'effort nécessaire que la presse doit exercer sur l'assemblage. Dans le cas d'un alésage normal,

$$\delta d_i^{\text{reel,max}} = e s_{\text{arbre}} \quad (\text{écart supérieur, provenant de l'ajustement ISO})$$

- On en déduit la pression maxi : on a $\delta d_i = p \frac{d_i}{E_e} \left(\frac{d_i^2 + d_e^2}{d_e^2 - d_i^2} + \nu_e \right) + p \frac{d_i}{E_i} \left(\frac{d_i^2 + d_0^2}{d_i^2 - d_0^2} - \nu_i \right)$

$$\rightarrow p^{\text{reel,max}} = \frac{\delta d_i^{\text{reel,max}}}{d_i} \frac{E_e E_i}{E_i \left(\frac{d_i^2 + d_e^2}{d_e^2 - d_i^2} + \nu_e \right) + E_e \left(\frac{d_i^2 + d_0^2}{d_i^2 - d_0^2} - \nu_i \right)}$$

$$F^{\text{presse, mini}} = \pi d_i p^{\text{reel,max}} L f s', \text{ avec } f \sim 0.2 .$$

- On prend habituellement une sécurité supplémentaire $s' \sim 1.4 \dots$

Assemblages arbre-moyeu

- Mise en place par dilatation thermique

On chauffe la frette, elle se dilate. On suppose ici une température uniforme, ce qui fait que les dilatations sont cubiques (égales dans toutes les directions, et aucune contrainte n'est créée (valable si la frette est d'un seul matériau)

- Les longueurs sont affectées par le coefficient de dilatation linéaire

$$l_t = l_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad \alpha \Delta T = \frac{\delta d_i}{d_i} \quad \begin{array}{ll} \alpha = 11.10^{-6} & (T > 25) \\ \alpha = 23.10^{-6} & (T < 0) \end{array} \quad \begin{array}{ll} \alpha = 9.10^{-6} & (T > 25) \\ \alpha = 18.10^{-6} & (T < 0) \end{array} \begin{array}{l} \text{Acier} \\ \text{Alu} \end{array}$$

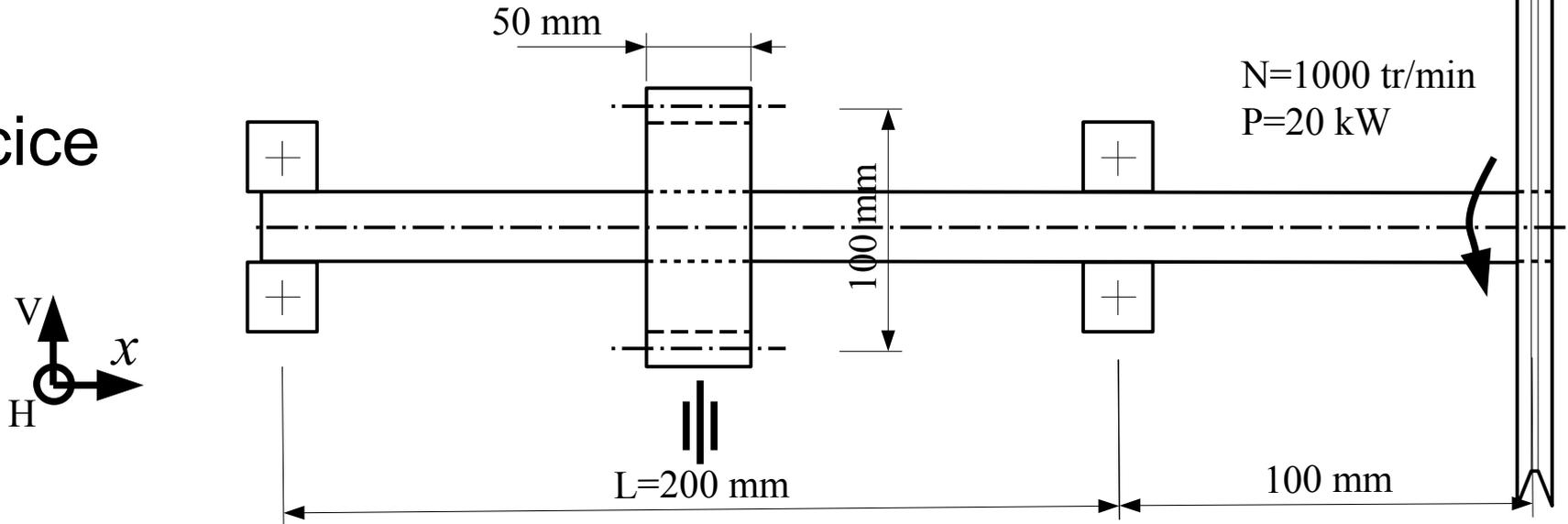
- On doit reprendre le serrage $\delta d_i^{\text{reel,max}}$, majoré d'un jeu supplémentaire J_0 permettant la glissement sans efforts, d'où :

$$\Delta T = \frac{\delta d_i^{\text{reel,max}} + J_0}{\alpha d_i} \quad T_{\text{frette}} = \frac{\delta d_i^{\text{reel,max}} + J_0}{\alpha d_i} + 25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \begin{array}{l} J_0 = \text{jeu moyen Hxhy} \\ \text{ou Hxgy } d_i > 40 \text{ mm} \end{array}$$

- Chauffage dans l'eau jusque 100 °C, huile jusque 190°C, flamme au-delà, mais attention aux transformations de structure du matériau !
- On peut aussi refroidir l'arbre, glace carbonique (-78 °C) ou azote liquide (-195 °C), dans le cas de forts jeux à rattraper ou si l'on ne peut chauffer la frette.

Dimensionnement des arbres

■ Exercice



- Un arbre transmet un mouvement d'une poulie vers une roue dentée droite ($\alpha : 20^\circ$). La roue dentée entraîne une autre située en dessous (non dessinée).

Suite de l'exercice des parties I/II :

- En considérant un diamètre de l'arbre constant = 40mm, calculer les ajustements pour un assemblage de la roue dentée par frettage, et proposer un différents modes opératoires pour effectuer l'assemblage. On considèrera le cas d'un **alésage normal**.

Note : tous les éléments sont en acier, contrainte limite pour le frettage $Re=270 \text{ Mpa}$, coefficient de frottement : $f=0.2$, Rugosité des surface : $Ra=1.6 \mu\text{m}$, facteur de sécurité sur le couple à transmettre : $s=1.8$, facteur de sécurité pour l'assemblage à la presse : $s'=1.4$, coefficient de dilatation linéique de l'acier : $\alpha = 11 \cdot 10^{-6}$