

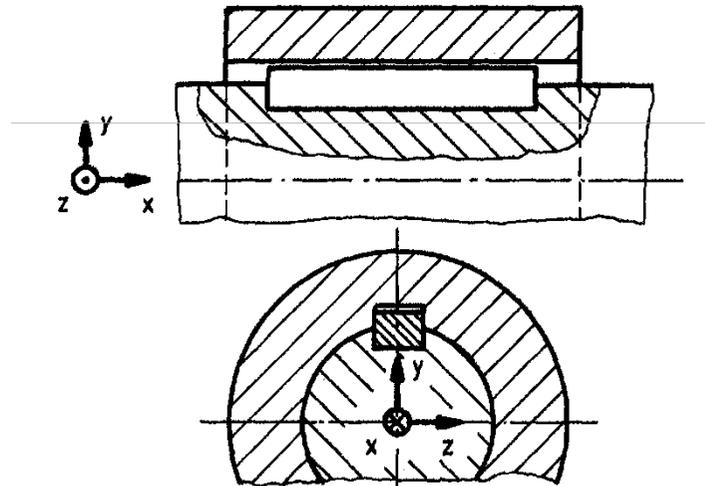
Dimensionnement des liaisons : quelques exemples

- Clavettes parallèles
- Cannelures à flancs parallèles
- Goupilles
- Frettage
- Liaisons boulonnées

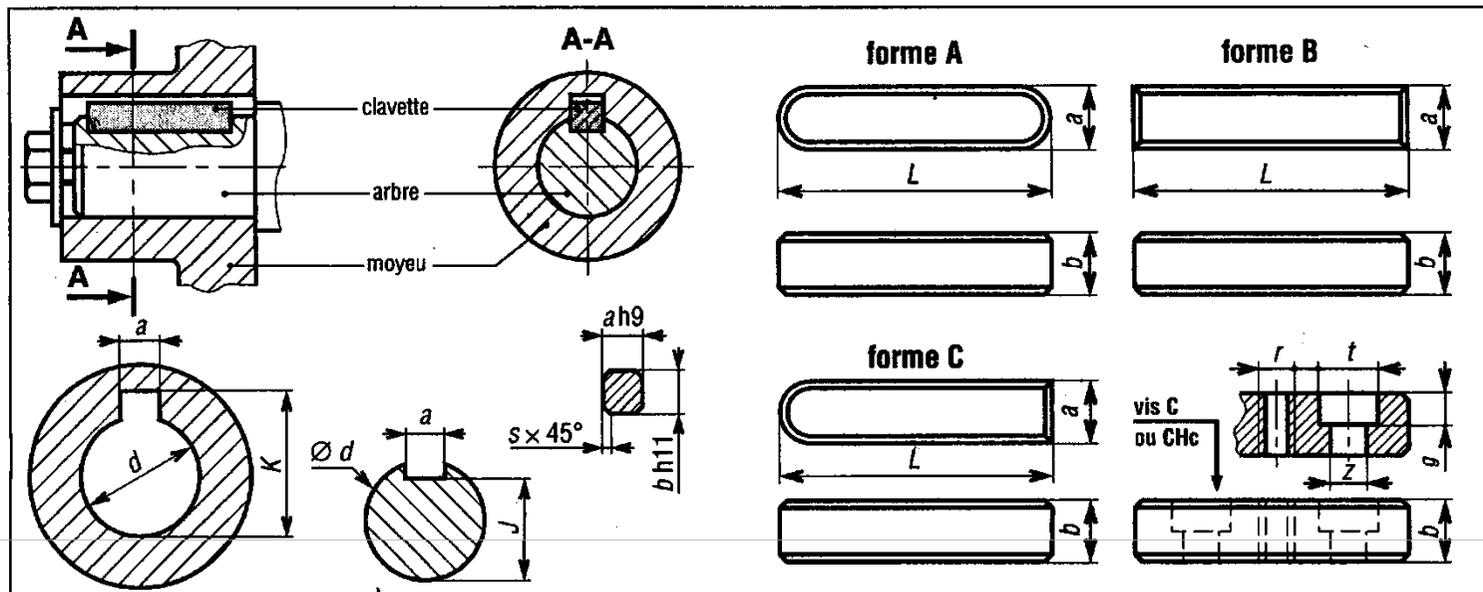
Clavettes parallèles

Parallélépipède rectangle implanté par moitié dans l'arbre et le moyeu

→ Liaison par obstacle en rotation (R_x)
un ddl de translation (T_x)

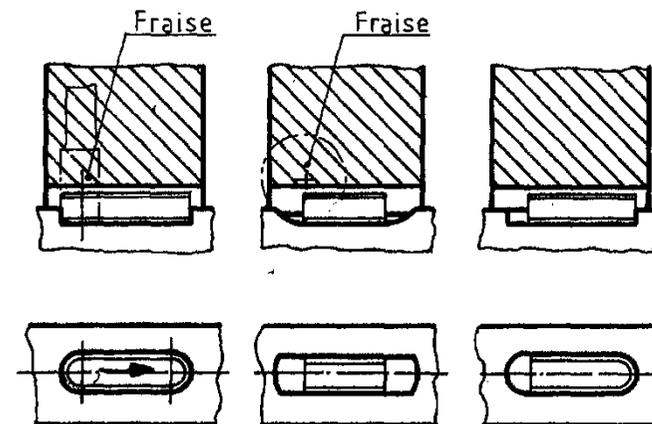


Utilisées pour : transmission de couple
liaison glissière (plus rarement)



Rainure débouchante dans l'alésage

Montage	Libre	normal	serré
a_{arbre}	H9	N9	P9
a_{moyeu}	D10	Js9	P9
a_{clavette}	h9	h9	h9



Principales dimensions normalisées

d	a	série normale					série mince		
		b	s	J	K	L	b^*	J^*	K^*
6 à 8 inclus	2	2	0,08	$d-1,2$	$d+1$	6 à 20			
8 à 10	3	3	à	$d-1,8$	$d+1,4$	6 à 36			
10 à 12	4	4	0,16	$d-2,5$	$d+1,8$	8 à 45			
12 à 17	5	5	0,16	$d-3$	$d+2,3$	10 à 56	3	$d-1,8$	$d+1,4$
17 à 22	6	6	à	$d-3,5$	$d+2,8$	14 à 70	4	$d-2,5$	$d+1,8$
22 à 30	8	7	0,25	$d-4$	$d+3,3$	18 à 90	5	$d-3$	$d+2,3$
30 à 38	10	8	0,25	$d-5$	$d+3,3$	22 à 110	6	$d-3,5$	$d+2,8$
38 à 44	12	8		$d-5$	$d+3,3$	28 à 140	6	$d-3,5$	$d+2,8$
44 à 50	14	9	à	$d-5,5$	$d+3,5$	36 à 160	6	$d-3,5$	$d+2,8$
50 à 58	16	10		$d-6$	$d+4,3$	45 à 180	7	$d-4$	$d+3,3$
58 à 65	18	11	0,4	$d-7$	$d+4,4$	50 à 200	7	$d-4$	$d+3,3$
65 à 75	20	12	0,4	$d-7,5$	$d+4,9$	56 à 220	8	$d-5$	$d+3,3$
75 à 85	22	14	à	$d-9$	$d+5,4$	63 à 250	9	$d-5,5$	$d+3,8$
85 à 95	25	14	0,6	$d-9$	$d+5,4$	70 à 280	9	$d-5,5$	$d+3,8$
95 à 110	28	16		$d-10$	$d+6,4$	80 à 320	10	$d-6$	$d+4,5$

Tolérances sur J et K

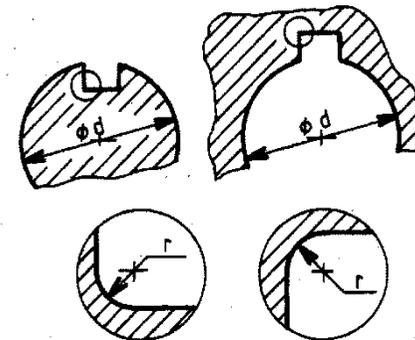
	$d \leq 22$	$22 < d \leq 130$	$130 < d \leq 230$
J	- 0	- 0	- 0
J	- 0.1	- 0.2	- 0.3
K	+ 0.1	+ 0.2	+ 0.3
K	+ 0	+ 0	+ 0

b : h9 si $a = b$
h11 si $a \neq b$

➡ Désignation normalisée : clavette parallèle, forme B, 18 x 11 x 60

matériau : en général E335 (ancienne norme : A60) (il faut $R_r \geq 600$ MPa)

Minimiser les concentrations de contraintes dues aux rainures dans l'arbre et l'alésage



Remarque : les clavettes sont à réserver aux petites séries

- pression de matage élevée
- prise de jeu
- risque de rupture
- tolérances d'usinage difficiles
- affaiblissement des arbres

Calcul de dimensionnement

Les clavettes sont sollicitées en matage et cisaillement

➡ calcul de matage plus restrictif en général

Etape 1 : détermination des dimensions transversales maxi (a x b) de la clavette en fonction du diamètre de l'arbre (voir tableau)

Etape 2 : détermination de la longueur l de la clavette permettant de supporter la pression de matage sur son flanc

Effort sur le flanc
de la clavette

$$F = \frac{C}{R}$$

Pression sur le flanc
de la clavette

$$p = \frac{F}{l b/2} < p_{adm}$$

C : couple à transmettre

R : rayon de l'arbre

en pratique :

☐ On choisit l dans les dimensions normalisées telle que

$$l > \frac{4C}{b D p_{adm}}$$

(attention à la longueur de l'alésage)

☐ On vérifie que : $\frac{l}{D} < 2.5$ (usinage de la rainure)

Remarque : le calcul au cisaillement est en général moins restrictif que le matage

$$\tau = \frac{F}{a l}$$

Pressions admissibles sur les flancs des clavettes (en MPa)			
Type de montage	Conditions de fonctionnement		
	Mauvaises	Moyennes	Excellentes
Glissant sous charge	3 à 10	5 à 15	10 à 20
Glissant sans charge	15 à 30	20 à 40	30 à 50
Fixe	40 à 70	60 à 100	80 à 150

Remarques :

✓ **si $l < 0.6 D$**

envisager des solutions moins coûteuses
remettre en cause le diamètre

✓ **si $l \geq 1.75 D$**

fixer la clavette

✓ **Choisir la longueur normalisée parmi les valeurs suivantes :**

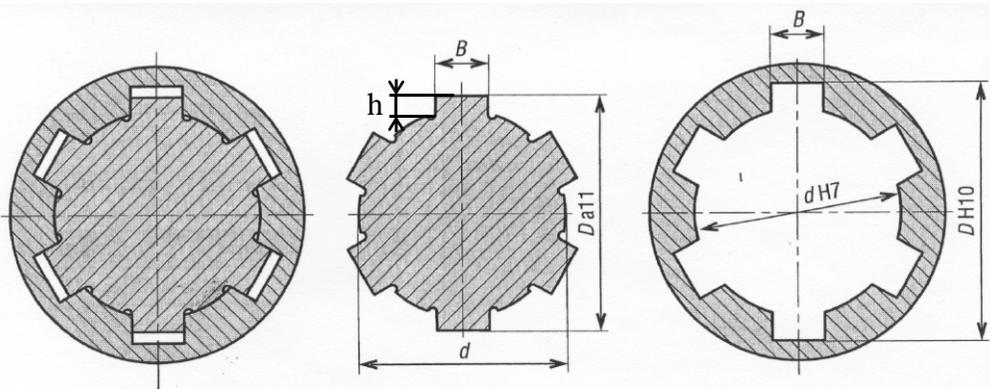
6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40, 45, 50, 56, 63, 70, 80,
90, 100, 110, 125, 140, 160, 180, 200, 220, 250, 280, 320, 360, 400, 450,
500.

✓ **liaison glissière**

si $d \leq 17$ mm, la clavette sera collée dans l'arbre

si $d > 17$ mm la clavette sera fixée par vis dans l'arbre

Cannelures à flancs parallèles



utilisées pour petites séries

série légère								série forte											
d	D	N	B	d	D	N	B	d	D	N	B	d	D	N	B				
23	26	6	6	56	62	8	10	11	14	6	3	28	34	6	7	62	72	8	12
26	30	6	6	62	68	8	12	13	16	6	3,5	32	36	8	6	72	82	10	12
28	32	6	7	72	78	10	12	16	20	6	4	36	42	8	7	82	92	10	12
32	36	8	6	82	88	10	12	18	22	6	5	42	48	8	8	92	102	10	14
36	40	8	7	92	98	10	14	21	25	6	5	46	54	8	9	102	112	10	16
42	46	8	8	102	108	10	16	23	28	6	6	52	60	8	10	112	125	10	18
46	50	8	9	112	120	10	18	26	32	6	6	56	65	8	10				
52	58	8	10																

tolérances de l'arbre		d	D	B	tolérances du moyeu		d	D	B
		glissant	f7	a11			d10	non traité	H7	H10	H9
fixe		h7	a11	h10	traité	H7	H10	H11	

Calcul de dimensionnement

Hypothèses : répartition de pression uniforme sur les flancs
 surface portante $A = 75\%$ de la surface théorique
 (en mm^2/mm)

$$A = \frac{3}{4} \cdot n \cdot h$$

n : nombre de cannelures

h : hauteur d'une cannelure

C : couple à transmettre

p : pression de contact

L : longueur des cannelures

D_m : diamètre moyen : $(D+d)/2$

Couple transmissible :

$$C = \frac{pALD_m}{2}$$

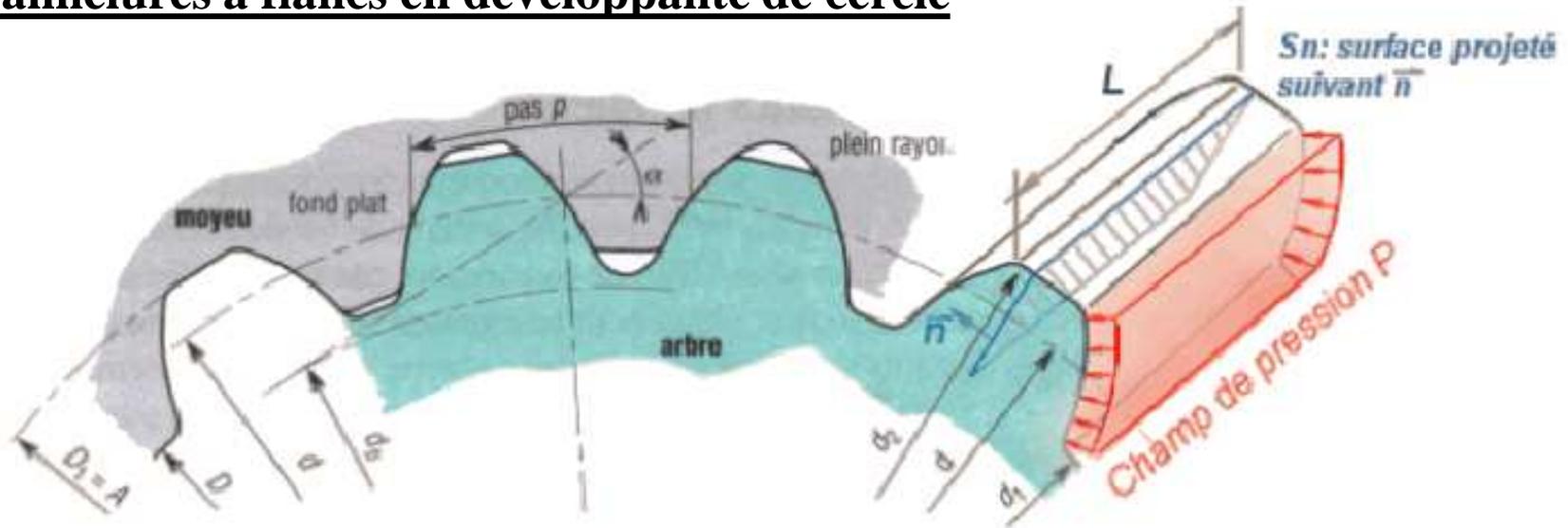
Condition de non matage :

$$p = \frac{2C}{ALD_m} \leq p_{adm}$$

Détermination de la longueur des cannelures :

$$L \geq \frac{8C}{3nhD_m p_{adm}}$$

Cannelures à flancs en développante de cercle



➤ Silencieuses, autocentrantes, grandes vitesses possibles,

A : surface portante équivalente par unité de longueur : $A = \frac{d_2 - d_1}{2} N_{dents}$

Couple transmissible : $C = p A L \left(\frac{d_1 + d_2}{4} \right) = \frac{p N_{dents} L}{8} (d_2^2 - d_1^2)$

Détermination de la longueur des cannelures :

$$L \geq \frac{8 C}{N_{dents} (d_2^2 - d_1^2) p_{adm}}$$

Goupilles

Calcul au cisaillement (simple ou double)

Efforts axiaux et radiaux

Cisaillement $\tau = \frac{4F}{\pi d^2} < R_{pg}$

Détermination du diamètre de la goupille

$$d \geq \sqrt{\frac{4F/n}{\pi R_{pg}}}$$

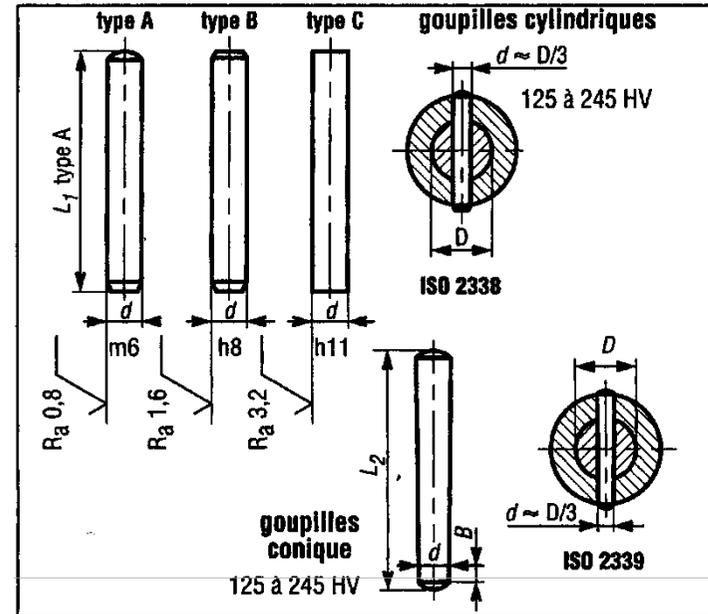
n : nombre de surfaces cisailées (1 ou 2)

Remarques : vérifier que $d < D/3$

attention à l'arbre : $4 \leq K_t \leq 6$

pour goupilles élastiques, voir doc. fabricant

Exemples



Frettage

- **fonction** : réaliser, uniquement par serrage, la transmission d'un couple ou d'un effort axial, sans glissement entre l'arbre et le moyeu.
- **avantages** : pas d'entailles
limitation des concentrations de contraintes
pas de balourd
- **limites** : utilisé pour diamètre > 50 mm (appariement pour diamètres inférieurs)
vitesses périphériques < 20 m/s (force centrifuge)
diamètre extérieur du moyeu supérieur à 1.5 fois le diamètre de l'arbre
aciers avec limite d'élasticité supérieure à 400 MPa

Serrage à partir de :

Ø	Ajustements		
	H6	H7	H8
[1, 3[	r5	s6	u7
[3, 6[	p5	r6	s7
[6, 18[	n5	r6	s7
[18,140[	n5	p6	s7
[140, 450[	n5	p6	r7
[450, 500[	p5	p6	r7

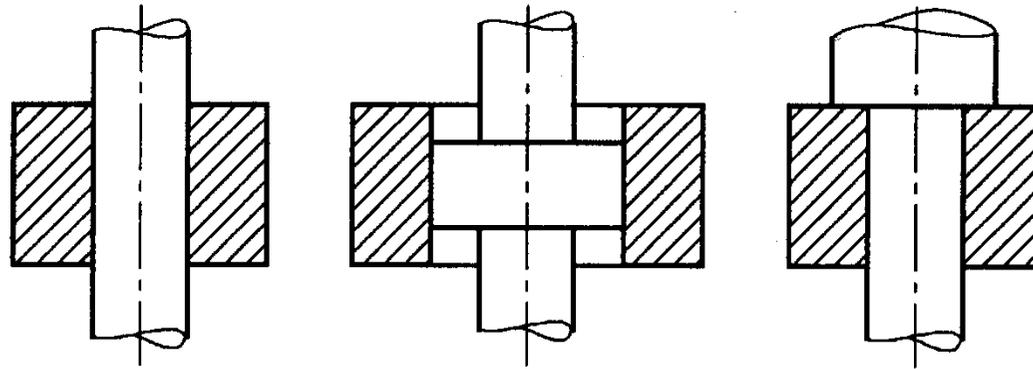
un ajustement incertain ne peut pas transmettre d'efforts

Montage : - à la presse

prévoir des chanfreins d'entrée sur l'arbre et l'alésage
lubrification des pièces avant montage
risque de grippage et variation de serrage

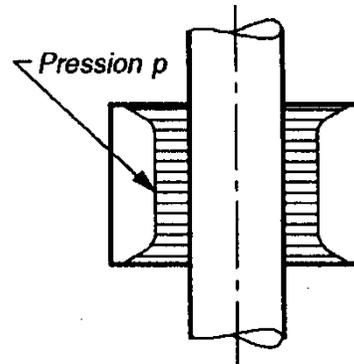
- dilatation de l'alésage et (ou) contraction de l'arbre
montage avec jeu et serrage au retour à l'ambiante
ne pas dépasser 350 °C

Dispositions constructives :



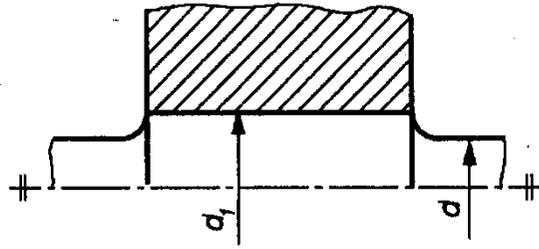
Répartition de pression de contact inhomogène

Exemple

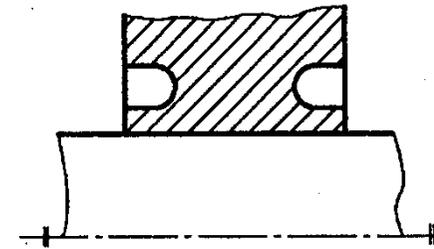


Nécessité de limiter les concentrations de contrainte

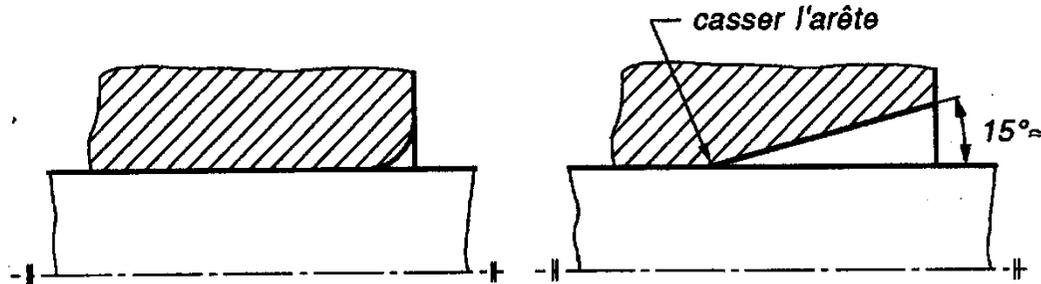
Solutions :



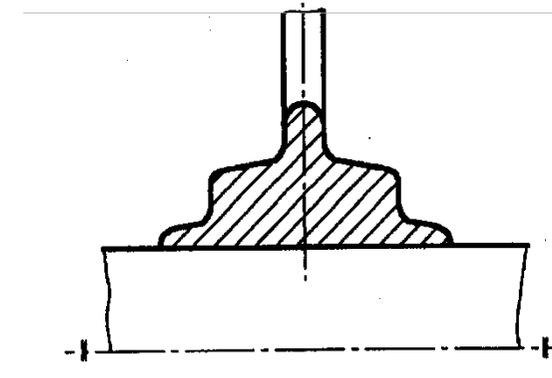
augmentation du diamètre
de l'arbre



gorges de déconcentration
de contraintes

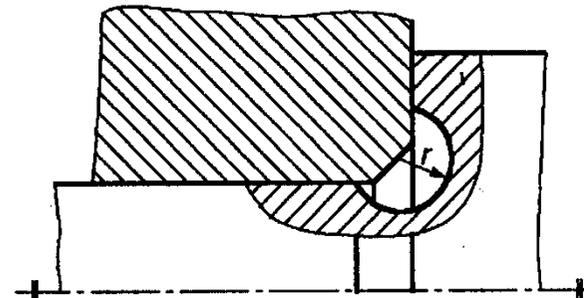
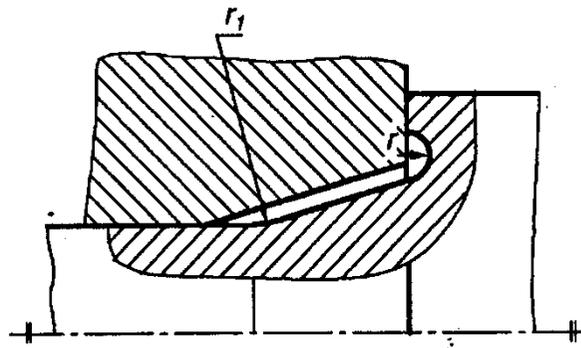
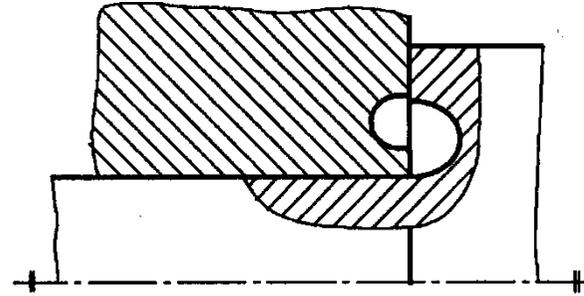
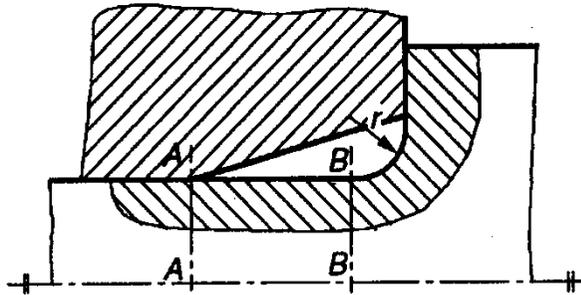


rayon d'entrée ou évasement
des extrémités du moyeu



diminution de l'épaisseur
des extrémités du moyeu

Cas des arbres épaulés :



But : éviter le cumul des concentrations de contraintes dues à l'effet d'encastrement et à l'effet d'entaille

usinages dangereux si défauts de surface ou mauvais raccordement des rayons

Tolérances et états de surface

IT : qualité 6 pour arbre jusqu'à 180 mm de diamètre, qualité 7 au-delà
qualité 6 pour alésage jusqu'à 100 mm de diamètre, qualité 7 au-delà

Rugosité : $R_a = 0.8 \text{ } \mu\text{m}$ pour alésages de diamètre ≤ 180
 $R_a = 1.6 \text{ } \mu\text{m}$ pour alésages de diamètre > 180

Tolérance de cylindricité : IT/4 au rayon

Lissage : perte de serrage due à l'écrasement des aspérités de surface

➡ majorer les serrages théoriques de quatre fois les R_a des deux pièces à assembler

$5 \text{ } \mu\text{m}$ pour $d \leq 180$

$10 \text{ } \mu\text{m}$ pour $d > 180$

Méthode de calcul

Hypothèses cas simple : les pressions intérieures et extérieures sont nulles
 les matériaux sont identiques
 l'arbre est plein

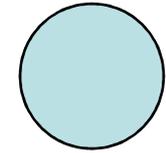
Données du calcul :

- Efforts à transmettre par la liaison :
 Couple C
 ou effort axial A
- Coefficient de sécurité de l'assemblage :
 k en général entre 1,5 et 3
- Dimensions de l'assemblage :
 d : diamètre nominal de l'assemblage
 D : diamètre extérieur du moyeu
 l : largeur de l'assemblage (gorges et chanfreins déduits)
- Matériau
 module d'Young E
 coefficient de Poisson ν
 coefficient de dilatation linéaire λ
 coefficient de frottement entre arbre et moyeu f

But du calcul :

- Définir les conditions de résistance de l'arbre et du moyeu (critère de Von Mises)
- Définir les tolérances de l'arbre et du moyeu
- Définir les conditions de montage (si assemblage par dilatation)
- Déterminer les paramètres :
 - couple de calcul ou effort de calcul
 - contrainte combinée maxi dans l'arbre et le moyeu
 - serrage dans l'assemblage (mini et maxi)
 - pression de frettage dans l'assemblage (mini et maxi)
 - dilatation, au montage, de l'alésage du moyeu

Valeur minimale de la pression de frettage



Cas de la transmission d'un couple C :

$$p_{\min} = \frac{2C}{\pi f l d^2}$$

Cas de la transmission d'un effort axial A :

$$p_{\min} = \frac{A}{\pi f l d}$$

Valeurs à multiplier par k, coefficient de sécurité

Valeur minimale du serrage théorique Δ

$$\frac{\Delta}{d} = \frac{2p_{\min}}{E} \left(\frac{D^2}{D^2 - d^2} \right)$$

Valeur maximale du serrage théorique Δ

$$\Delta_{\max} = \Delta_{\min} + IT_A + IT_M$$

arbre au maximum de sa tolérance
moyeu au minimum

Valeur maximale de la pression de frettage

$$p_{\max} = p_{\min} \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\min}}$$

contrainte combinée dans l'arbre

$$\sigma_{eA_{\max}} = p_{\max}$$

condition de résistance de l'arbre

$$\sigma_{eA_{\max}} \leq \frac{R_e}{s}$$

s : coefficient de sécurité (1,25 pour prise en compte des contraintes dues aux efforts transmis)

contrainte combinée dans le moyeu

$$\sigma_{eM_{\max}} = \frac{p_{\max} d^2}{D^2 - d^2} \sqrt{1 + 3 \left(\frac{D}{d} \right)^4}$$

condition de résistance du moyeu

$$\sigma_{eM_{\max}} \leq \frac{R_e}{s}$$

Si ces conditions ne sont pas remplies, reprendre le calcul en modifiant les matériaux ou les dimensions

Tolérances de l'arbre et du moyeu

Cylindricité : $t = IT/4$ pour l'arbre et le moyeu

Etat de surface Rugosité : $Ra = 0.8 \mu\text{m}$ pour alésages de diamètre ≤ 180
 $Ra = 1.6 \mu\text{m}$ pour alésages de diamètre > 180

Tolérances dimensionnelles

Cas de l'alésage normal

Moyeu :

$$d_{M_{\min}} = d$$
$$d_{M_{\max}} = d + IT_M$$

Arbre :

$$d_{A_{\max}} = d + \Delta_{\max} + \text{lissage}$$
$$d_{A_{\min}} = d + \Delta_{\max} + \text{lissage} - IT_A$$

Cas de l'arbre normal

Arbre :

$$d_{A_{\max}} = d$$
$$d_{A_{\min}} = d - IT_A$$

Moyeu :

$$d_{M_{\min}} = d - (\Delta_{\max} + \text{lissage})$$
$$d_{M_{\max}} = d - (\Delta_{\max} + \text{lissage}) + IT_M$$

Conditions de montage : dilatation

il faut créer un jeu de montage entre arbre et moyeu (éviter coincements)

$j = 0,15$ pour arbre jusqu'à $d = 100$

$j = 0,2$ pour arbre $100 < d \leq 200$

$j = 0,25$ pour arbre de $d > 200$



dilatation du diamètre du moyeu : a

$$a = j + \Delta_{\max} + \text{lissage}$$



élévation de température

$$\Delta T = \frac{a}{\lambda d}$$

(Rappel : acier : $\lambda = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, aluminium : $\lambda = 23 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

Liaisons boulonnées

p = pas

H = hauteur du filetage = $0,866p$

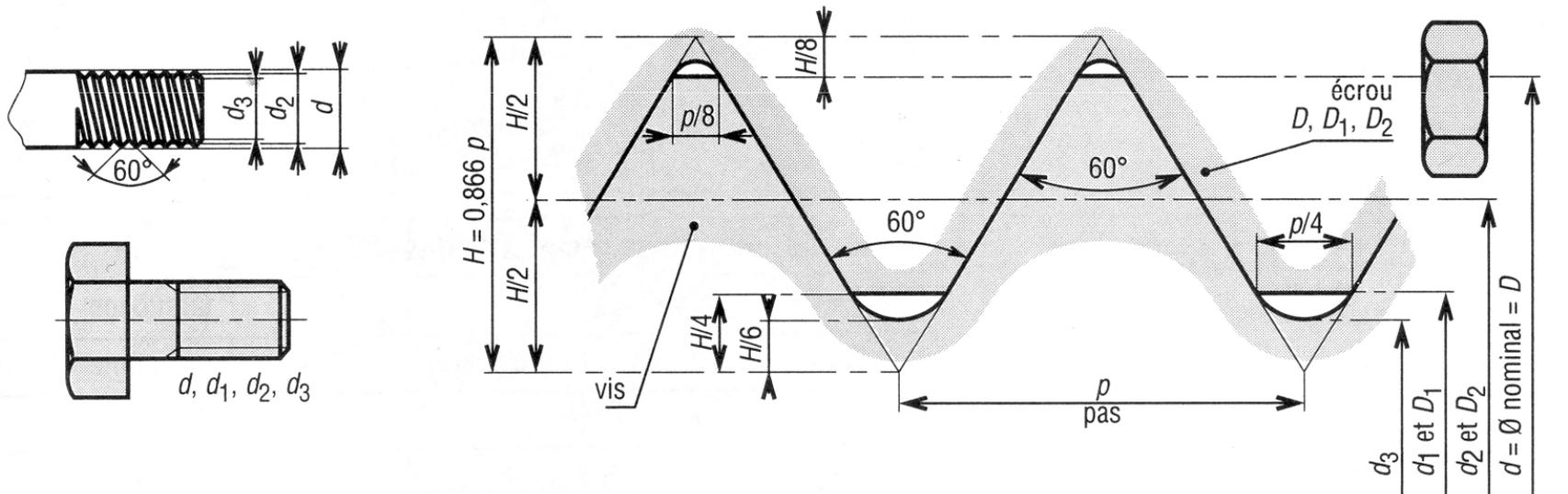
$D = d$ = diamètre nominal (vis et écrou)

$D_2 = d_2$ = diamètre sur flanc (vis et écrou) = $d - 0,6495p$

$D_1 = d_1$ = diamètre intérieur du taraudage (écrou) = $d - 1,0825p$

d_3 = diamètre intérieur du filetage (vis) = $d - 1,2268p$

(d_3 = diamètre du noyau)



Classes de qualité

Vis

marquage des têtes										
classes de résistance	3.6	4.6	3.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
limite élastique R_e N/mm ² ou MPa	180	240	320	300	400	480	640	720	900	1 080
limite à la rupture R_r N/mm ² ou MPa	330	400	420	500	520	600	800	900	1 040	1 220
A%	25	22	14	20	10	8	12	10	9	8
 $R_e = R_r \times \frac{Y}{10}$ (en N/mm ²) $R_r = 100 \times S$ (en N/mm ²) $R_e = S \times Y$ (daN/mm ²)						 vis CHc 				

Ecrous

qualité des écrous		04	05		06	08	09		10	12		
contrainte d'épreuve ou charge limite en N/mm ²		400	500		600	800	900		1 000	1 200		
vis conjuguées	classe	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	8.8	9.8	10.9	12.9
	diamètres M	> 16	≤ 16	tous	tous	tous	tous	16 < M ≤ 39	≤ 16	tous	≤ 39	

- ❑ Charge de traction supportée par la vis

$$F_{\text{maxi}} = 0,9 R_e S_{\text{eq}}$$

S_{eq} : section résistante de la vis
(voir tableau)

R_e : limite élastique du matériau

- ❑ Couple de serrage

$$C = (0,16 p + 0,583.f_f.d_2 + 0,5.f_t.D_m).F$$

p : pas (mm)

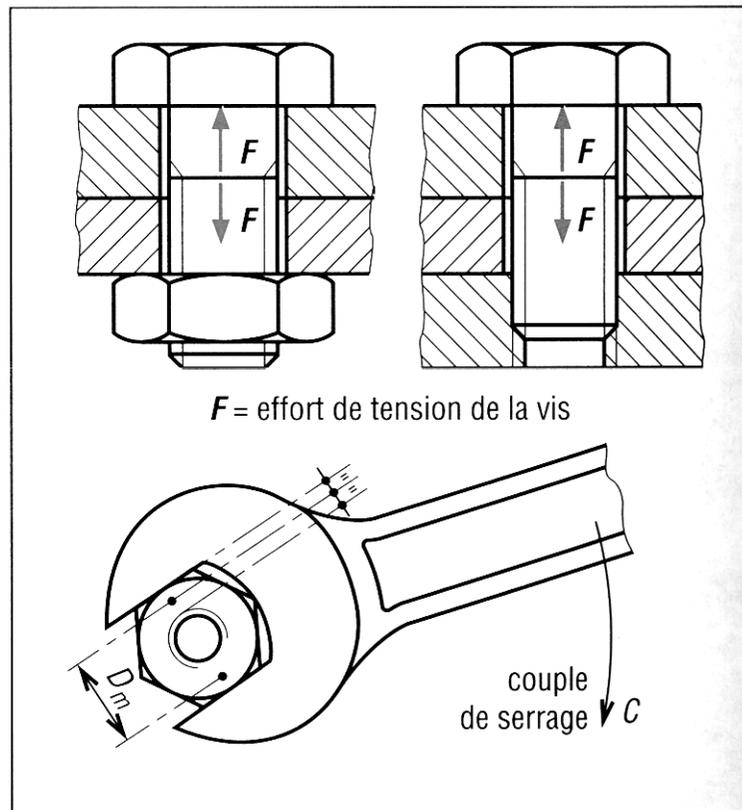
d_2 : diamètre sur flanc

f_f : frottement au niveau du filetage

f_t : frottement sous tête

D_m : diamètre moyen sous tête

F : tension de la vis



Valeur des facteurs de frottement

Valeurs du frottement			nature face d'appui (support, pièce, rondelle...) Nature filetage de l'écrou					
valeurs de f_f et f_t			acier non traité			fonte grise usinée		
			laminé	usiné	rectifié			
nature filetage vis	acier noirci	embouti roulé	0,13 à 0,19	0,10 à 0,18	0,16 à 0,22	0,10 à 0,18		
		ou phosphaté	usiné	0,10 à 0,18		0,10 à 0,18	0,10 à 0,18	
nature face inférieure tête de vis (ou écrou)	acier galvanisé		0,10 à 0,18	0,10 à 0,18	0,10 à 0,18	0,10 à 0,18		
conditions d'emploi			huilé			huilé		
valeurs de f_f et f_t			acier traité			alliages Al et Mg	acier	
			cadmié	galvanisé	phosphaté		cadmié	galvanisé
nature filetage vis	acier noirci	embouti roulé	0,08 à 0,12	0,10 à 0,18	0,12 à 0,20	0,08 à 0,16	0,08 à 0,16	0,10 à 0,18
		ou phosphaté	usiné	0,08 à 0,16	0,10 à 0,16			
nature face inférieure tête de vis (ou écrou)	acier galvanisé			0,16 à 0,20				0,20 à 0,30
conditions d'emploi			huilé			huilé	à sec	

Précision du couple de serrage

Type de matériel	Classe de précision	Précision
Clés à choc, clef à main	D	± 20 à ± 50 %
Visseuses simples Clefs dynamométriques à déclenchement simple	C	± 10 à ± 20 %
dynamométrique à déclenchement automatique	B	± 5 à ± 10 %
Clef dynamométrique électronique	A	$< \pm 5$ %

Filetage métrique à pas gros

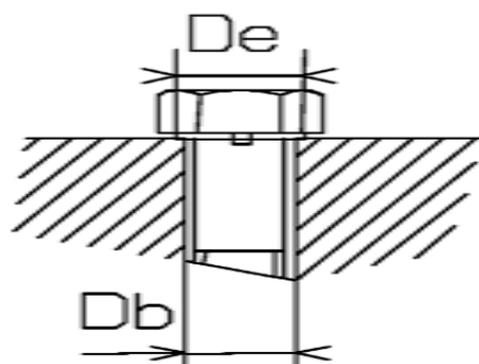
d (mm)	pas gros	S_{eq} en mm ² section résistante	D_1 (mm)	$D_2 = d_2$ (mm)	d_3 (mm)	pas fins recommandés
1	0,25	0,460	0,729	0,838	0,693	
(1,1)	0,25	0,588	0,829	0,938	0,793	
1,2	0,25	0,732	0,929	1,038	0,893	
(1,4)	0,30	0,983	1,075	1,205	1,032	0,2
1,6	0,35	1,27	1,221	1,373	1,171	0,2
(1,8)	0,35	1,70	1,421	1,573	1,371	0,2
2	0,4	2,07	1,567	1,740	1,509	0,25
(2,2)	0,45	2,48	1,713	1,908	1,648	0,35
2,5	0,45	3,39	2,013	2,208	1,948	0,35
3	0,5	5,03	2,459	2,675	2,387	0,35
(3,5)	0,6	6,78	2,850	3,110	2,764	0,35
4	0,7	8,78	3,242	3,545	3,141	0,5
(4,5)	0,75	11,3	3,688	4,013	3,580	0,5
5	0,8	14,2	4,134	4,480	4,019	0,5
6	1	20,1	4,918	5,350	4,773	0,75
(7)	1	28,9	5,918	6,350	5,773	0,75
8	1,25	36,6	6,647	7,188	6,466	1 - (0,75)
10	1,5	58,0	8,376	9,026	8,160	1,25 - (1 - 0,75)
12	1,75	84,3	10,106	10,863	9,853	1,5 - (1,25 - 1)
(14)	2	115	11,835	12,701	11,546	1,5 - (1,25 - 1)
16	2	157	13,835	14,701	13,546	1,5 - (1)
(18)	2,5	192	15,294	16,376	14,933	2 - (1,5 - 1)
20	2,5	245	17,294	18,376	16,933	2 - (1,5 - 1)
(22)	2,5	303	19,294	20,376	18,933	2 - (1,5 - 1)
24	3	353	20,752	22,051	20,319	2 - (1,5 - 1)
(27)	3	459	23,752	25,051	23,319	2 - (1,5 - 1)
30	3,5	561	26,211	27,727	25,706	2 - (1,5 - 1)
(33)	3,5	694	29,211	30,727	28,706	2 - (1,5)
36	4	817	31,670	33,402	31,093	3 - (2 - 1,5)
(39)	4	976	34,670	36,402	34,093	3 - (2 - 1,5)
42	4,5	1 121	37,129	39,077	36,479	4 - (3 - 2 - 1,5)
(45)	4,5	1 306	40,129	42,077	39,479	4 - (3 - 2 - 1,5)
48	5	1 473	42,587	44,752	41,866	4 - (3 - 2 - 1,5)
(52)	5	1 758	46,587	48,752	45,866	4 - (3 - 2 - 1,5)
56	5,5	2 030	50,046	52,428	49,252	4 - (3 - 2 - 1,5)
(60)	5,5	2 362	54,046	56,428	53,252	4 - (3 - 2 - 1,5)
64	6	2 676	57,505	60,103	56,639	4 - (3 - 2 - 1,5)

Il faut que la pression sous la tête de la vis soit inférieure à la pression admissible des deux matériaux.

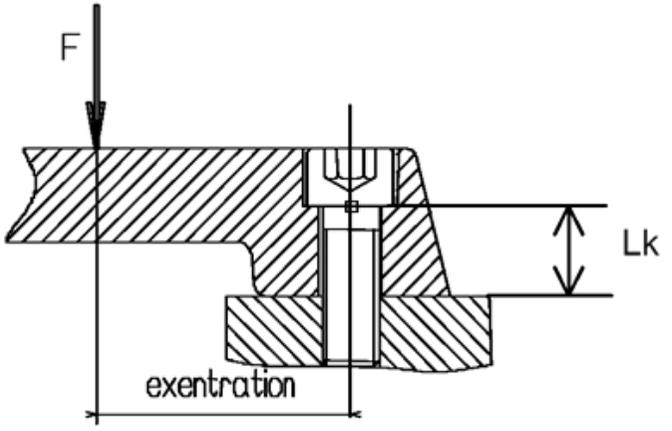
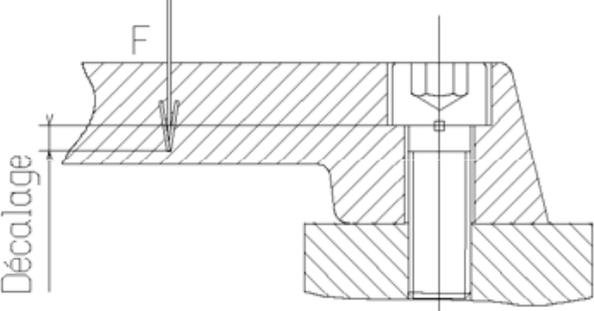
$$P = F_{\text{tot}} / (n \cdot A_m)$$

$$\text{avec } A_m = \pi/4 \cdot (D_e^2 - D_b^2)$$

- ✓ D_e : diamètre extérieur d'appui sous tête ou sous écrou ou sous rondelle
- ✓ D_b : diamètre du perçage
- ✓ n : nombre de vis



Matériaux des pièces assemblées			P_{adm} (Mpa)
Acier	recuit	0.16 < %C < 0.22	240
		0.35 < %C < 0.40	280
		0.42 < %C < 0.48	320
	Trempe revenu	$R > 900$ Mpa	720
		$R > 1200$ Mpa	1000
	cémenté	1400 à 1800	
Acier inoxydable	Z10CN18 09	500 < R_m < 700 Mpa	210
Fonte	FGL 250		450
	FGS 500		550
Alliage léger	A-S 10		80 à 130
	AU 5GT		180
Matériaux composite			120

<p>Excentration de la charge</p>	<p>Limiter l'excentration (flexion dans la vis) Ne pas avoir une excentration supérieure à la hauteur Lk.</p>	
<p>Point d'application de la charge</p>	<p>Limiter le décalage (pour que la rigidité de l'assemblage soit maximum)</p>	
<p>Largeur de la surface de contact</p>	<p>La surface de contact qui supporte la charge (important lors d'une charge excentrée) est définie par $W=Lk+De$ Il faut donc jouer sur l'épaisseur de la pièce et le diamètre de la vis pour obtenir une bonne largeur de contact.</p>	