Conception des pièces moulées

I. Introduction

La qualité de la pièce obtenue dépend, dans un premier stade du soin pris par le concepteur dans son tracé et dans un deuxième stade de la dextérité du mouleur. La réalisation d'une pièce moulée est rarement impossible, cependant la qualité et le prix de revient dépendent de la conception de la pièce et du moule.

II. Caractéristiques des pièces moulées

La gamme des matériaux à mouler est très étendue, les principaux alliages utilisés sont les fontes, les aciers, les alliages de cuivre, aluminium, zinc, magnésium, plomb, etc. Le tableau suivant récapitule la température de fusion et la masse volumique de certains métaux:

Métal	***Symbole***	***Température de fusion (°C)***	***Masse volumique (g/cm^3)***	***Métal***	***Symbole***	***Température de fusion (°C)***	***Masse volumique (g/cm^3)***
Aluminium	Al	658	2,66	***Plomb***	Pb	327	11,3
Argent	Ag	960	10,5	***Zinc***	Zn	419	7,19
Chrome	Cr	1550	6,74	***Acier***	Fe+C	1400	7,85
Cuivre	Cu	1090	8,9	***Alpax***	Al+Si	600	2,68
Etain	Sn	232	7,28	***Bronze***	Cu+Sn	900	7,8-8,5
Fer	Fe	1535	7,95	***Fonte***	Fe+C	1230	7,2
Magnésium	Mg	649	1,74	***Laiton***	Cu+Zn	940	7,3-8,4
Or	Au	1063	19,3	***Zamak***	Sn+Al	420	6,6

III. Etapes de conception des pièces moulées

1. *Lecture du cahier de charge:* Pendant cette étape, le modeleur est chargé de s'informer sur:
   - le matériau de(s) la pièce(s) à mouler (donc de sa température de fusion),
   - la cadence de production,
   - etc.
2. *Lecture du dessin de définition*: Pendant cette étape, le modeleur est chargé de:
   - comprendre les formes de la pièce,
   - s'informer de l'échelle indiquée,
   - s'assurer des surfaces à usiner et de celles qui vont rester brutes,
   - lire la rugosité minimale inscrite sur une des surfaces à usiner,
   - lire les dimensions maximale et minimale de la pièce et s'informer sur les tolérances,
   - etc.
3. *Choix du procédé de moulage*: Pendant cette étape, le modeleur est chargé de choisir le procédé de moulage adéquat en fonction (suivre les consignes de la règle 1):
   - de la nature de l'alliage coulé,
   - de la cadence de production,

- du poids de la pièce,
- de l'épaisseur de la pièce,
- de la rugosité et de l'intervalle de tolérance,
- etc.

4. *Choix du plan de joint:* (suivre les consignes de la règle 3).
5. *Ajout du retrait, des surépaisseurs d'usinage et des dépouilles pour tracer le modèle:* (respecter l'échelle du tracé) suivre les consignes de la règle 7, 8 et 9.
6. *Confection de la boîte à noyau et du noyau:* suivre les consignes de la règle 5.
7. *Dimensionnement du système de coulée* (suivre les consignes de la règle 12).
8. *Dimensionnement du châssis:* suivre les consignes de la règle 4.
9. *Choix du type et dimensionnement de la masselotte* :suivre les consignes de la règle 9.

IV. Règles de conception des pièces moulées

***Règle 1*:** Choisir le procédé de moulage

- en fonction de la nature de l'alliage coulé

Procédé de moulage	***Métaux ou alliages***					
	Fontes	***Aciers***	***Alliages de cuivre***	***Alliages d'aluminium***	***Alliages de magnésium***	***Alliages divers (Zn, Sn, Pb)***
En sable	+++	+++	+++	0	++	0
En carapace	+++	+++	+++	+++	0	0
A la cire perdue	++	+++	+	+++	++	0
En coquille par gravité	+++	0	+++	+++	+++	+++
En coquille sous pression	0	0	+++	+++	+++	+++
Par centrifugation	+++	+++	+++	+	0	0
+++: Très utilisé; ++: Emploi possible; +: Rarement utilisé; 0: Inutilisé						

- en fonction du nombre minimal de pièces à produire

Procédé de moulage	***Métaux ou alliages***					
	Fontes	***Aciers***	***Alliages de cuivre***	***Alliages d'aluminium***	***Alliages de magnésium***	***Alliages divers (Zn, Sn, Pb)***
Au sable	1	1	1	-	10 à 50	-
En carapace	500 à 1000	500 à 1000	500	500	-	-
A la cire perdue	500	50	-	50	100	-
En coquille par gravité	250 à 1000	-	200 à 300	500	500	500
En coquille sous pression	-	-	2000	2000	5000	2000
Par centrifugation	200 à 1000	200 à 1000	200 à 1000	-	-	-

❖ en fonction du poids de la pièce à mouler en Kg et de son matériau

Procédé de moulage	***Métaux ou alliages***					
	Fontes	***Aciers***	***Alliages de cuivre***	***Alliages d'aluminium***	***Alliages de magnésium***	***Alliages divers (Zn, Sn, Pb)***
Au sable	Pas de limite	Pas de limite	5000	-	700	-
En carapace	100	100	5 à 30	20	-	-
A la cire perdue	20	25	-	10	1,5	-
En coquille par gravité	100	-	5	60	10	10
En coquille sous pression	-	-	5	30 à 50	15	30 à 50
Par centrifugation	20000	8000	600	-	-	-

❖ en fonction de l'épaisseur de la pièce à mouler en mm et de son matériau

Procédé de moulage	***Métaux ou alliages***					
	Fontes	***Aciers***	***Alliages de cuivre***	***Alliages d'aluminium***	***Alliages de magnésium***	***Alliages divers (Zn, Sn, Pb)***
Au sable	2,5	5	2,5 à 3	-	3,5	-
En carapace	2,5	3	4	3	-	-
A la cire perdue	1,5 à 2	0,5 à 1	-	0,8 à 1,5	1,5 à 5	-
En coquille par gravité	3	-	3	2,5 à 3	3 à 3,5	1,5 à 2
En coquille sous pression	-	-	2 à 4	1,5 à 3	1 à 3	0,8 à 2
Par centrifugation	2	5	5	-	-	-

- Les dimensions inscrites dans le tableau sont la dimension minimale et maximale de la pièce à mouler (cette dimension englobe les surépaisseurs d'usinage et les dépouilles).

❖ en fonction de la rugosité en µm et l'intervalle de tolérance en mm

Procédé de moulage	***Fontes GL ou GS***		***Fontes malléables***		***Aciers***		***Alliages de cuivre***		***Alliages d'aluminium***		***Alliages de magnésium***		***Alliages divers (Zn, Sn, Pb)***	
	IT	***R_a***	***IT***	***R_a***	***IT***	***R_a***	***IT***	***R_a***	***IT***	***R_a***	***IT***	***IT***	***IT***	***R_a***
Au sable	±2	20	±1,5	20	±3	25	±1,7	20	±1,5	12	±0,8	10	±0,5	10
En carapace	±0,7	8	±0,6	7	-	-	±0,5	5	±0,6	4	±0,6	4	-	-
En coquille par gravité	±1,5	5	±1,2	5	-	-	±1	3	±0,8	2	±0,8	2	±0,6	1,5
En coquille sous pression	-	-	-	-	-	-	±0,4	2	±0,3	1,5	±0,3	1,5	±0,2	1
Par centrifugation	±1,5	10	±1,2	6	-	-	±0,8	4	-	-	-	-	-	-
Coulée continue	±0,6	10	±0,8	15	-	-	±0,6	10	-	-	-	-	-	-

Selon les dimensions des pièces, les tolérances obtenues par le procédé de moulage à la cire perdue sont les suivantes:

Dimension (mm)	≤ 6	≤ 10	≤ 18	≤ 30	≤ 50	≤ 80	≤ 120
Tolérance (mm)	± 0,10	± 0,13	± 0,14	± 0,18	± 0,30	± 0,45	± 0,60

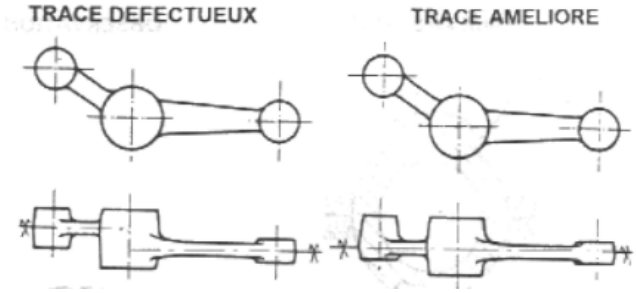
***Règle 2*:** Nombre de pièces

Envisager des pièces multiples, simples et économiques plutôt qu'une seule si c'est possible.

***Règle 3*:** Choix du plan de joint

Le plan de joint est le plan de séparation des deux châssis: c'est une surface qui contient la plus grande section ou le plan de symétrie de la pièce. On emploie des chapes s'il y a plus d'une surface de joint. Il faut choisir un nombre minimal de joints, de préférence plans et perpendiculaires au sens de démoulage.

Symbole



Exemple

Ce choix dépend aussi des contre dépouilles, des dimensions des châssis, des positions des usinages, etc. Il doit limiter le nombre de noyaux.

***Règle 4*:** Châssis

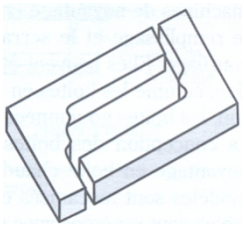
Un châssis est un cadre rigide devant contenir et maintenir le sable qui constitue le moule. Les matériaux constitutifs sont l'acier moulé, la fonte, l'acier profilé ou soudé ou l'alliage d'aluminium. Un châssis peut être carrée, rectangulaire, rond, polygonale ou de forme quelconque.

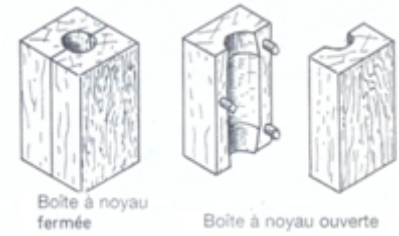
l	**Largeur "*l*" des châssis rectangulaires, côté des châssis carrés ou diamètre des châssis ronds (mm)**												
	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
	Hauteur "H" en mm												
315	100												
400	125	125											
500	125	125	125										
630	125	160	160	160									
800	160	160	160	160									
1000	160	160	160	200	200	200							
1250	160	200	200	200	200	200	200						
1600	200	200	200	200	200	250	250	250					
2000	200	200	200	250	250	250	250	250	250				
2500		250	250	250	250	250		315	315	315			
3150			250	250	250	315	315	315	315	315	315		
4000			315	315		315	315	315	315	400	400	400	
5000				315	315	315	315	400	400	400	400	400	400

***Règle 5*:** Noyau

- Choix de la boîte à noyau

Les boîtes à noyau peuvent être en bois, métalliques ou en résine synthétique. Selon leurs conception, on trouve les boîtes en forme de cadre sans fond ou les boîtes goujonnées.

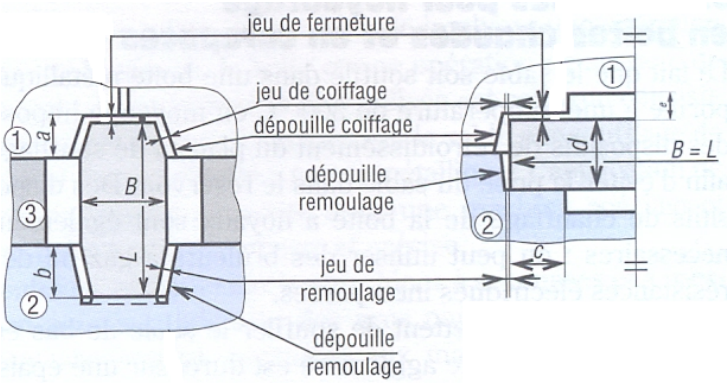




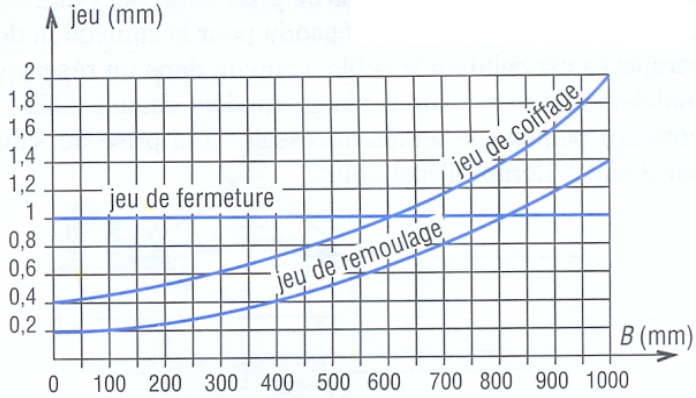
Le choix de son matériau et du type de noyautage obéit aux consignes du tableau suivant:

Type de boîtes	***Nombre de pièces***			***Noyautage***	
	Unitaire	***Petite à moyenne série***	***Grande série***	***Main***	***Sur machine***
En bois	x	x		x	
Métallique			x		x
En résine synthétique			x		x

- Dimensionnement du noyau



Dépouille en %		1	2	5	10	20	50	100
Portées de noyaux	Dépouille remoulage							
	Dépouille coiffage							



a = 10 à 15mm; b=20 à 40mm et c=d

d: diamètre du noyau en sable aggloméré, *L*: longueur du noyau, B: La plus grande dimension du noyau parallèle au plan du joint du moule.

***Règle 6*:** Surfaces brutes

Les surfaces qui doivent rester brutes après usinage doivent être placées à la partie inférieure du moule.

***Règle 7*:** Retrait

Le retrait étant l'espace qui apparaît entre la pièce et le moule lors du refroidissement. Ce phénomène est due à la modification de la masse volumique en fonction de la température. Le retrait est fonction du matériau coulé.

Alliage		***Valeurs prises en compte pour réaliser l'outillage du moule (%)***
Alliages d'aluminium	***et de cuivre***	1,2 à 1,4
	et de Magnésium	1,2 à 1,4
	et de Silicium	1,1 à 1,3
	et de Zinc	1,5
Alliages de cuivre	***Cupro-aluminium***	1,8
	Bronzes	1,2 à 1,4
	Laiton	1,5
	Laiton haute résistance	1,7
Alliages ferreux	***Aciers moulés non alliés***	2 à 2,4
	Aciers moulés alliés	2,2 à 2,4
	Fonte GL	0,5 à 1,2
	Fonte GS	1 à 1,7
	Fonte alliée	1,5 à 2
Alliages de magnésium		5
Alliages de zinc		0,4 à 0,5

***Règle 8*:** Dépouille

La dépouille permet de faciliter l'extraction du modèle en moulage en sable ou de la pièce en moulage en coquille.

Procédé de moulage	***Fontes***	***Aciers***	***Alliages de cuivre***	***Alliages d'aluminium***	***Alliages de zinc***
En sable	5%	3%	3%	3%	3%
En coquille par gravité			3%	2,5%	2,5%
En coquille sous pression			1,5%	1,5%	1%

***Règle 9*:** Surépaisseur d'usinage

Les surépaisseurs d'usinage sont prévues pour supprimer l'effet du moulage sur les surfaces fonctionnelles afin d'obtenir la précision dimensionnelle demandée. Selon la norme ISO 8062, les tableaux suivants résument les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des tolérances de moulage en fonction de la nature du matériau coulé et du type de moulage choisi.

Type de moulage	***Classe des surépaisseurs d'usinage spécifiées***								
	Métaux et alliages de coulée								
	Acier	*Fonte grise*	*Fonte à graphite sphéroïdale*	*Fonte malléable*	*Alliage de cuivre*	*Alliage de zinc*	*Alliages de métaux légers*	*Alliages à base de nickel*	*Alliages à base de cobalt*
Moulage en sable à la main	G à K	F à H	F à H	F à H	F à H	F à H	F à H	G à K	G à K
Moulage en sable mécanique et moulage en carapace	F à H	E à G	E à G	E à G	E à G	E à G	E à G	F à H	F à H

Moulage en coquille par gravité/basse pression	-	D à F	D à F	D à F	D à F	D à F	D à F	-	-
Moulage en coquille sous pression	-	-	-	-	B à D	B à D	B à D	-	-
Moulage de précision	E	E	E	-	E	-	E	E	E

Surépaisseurs d'usinage											
Cote la plus large (mm)		*Classe des surépaisseurs d'usinage spécifiées*									
Au dessus de	*Jusqu'à et y compris*	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*	*H*	*J*	*K*
-	*40*	*0,1*	*0,1*	*0,2*	*0,3*	*0,4*	*0,5*	*0,5*	*0,7*	*1*	*1,4*
40	*63*	*0,1*	*0,2*	*0,3*	*0,3*	*0,4*	*0,5*	*0,7*	*1*	*1,4*	*2*
63	*100*	*0,2*	*0,3*	*0,4*	*0,5*	*0,7*	*1*	*1,4*	*2*	*2,8*	*4*
100	*160*	*0,3*	*0,4*	*0,5*	*0,8*	*1,1*	*1,5*	*2,2*	*3*	*4*	*6*
160	*250*	*0,3*	*0,5*	*0,7*	*1*	*1,4*	*2*	*2,8*	*4*	*5,5*	*8*
250	*400*	*0,4*	*0,7*	*0,9*	*1,3*	*1,8*	*2,5*	*3,5*	*5*	*7*	*10*
400	*630*	*0,5*	*0,8*	*1,1*	*1,5*	*2,2*	*3*	*4*	*6*	*9*	*12*
630	*1000*	*0,6*	*0,9*	*1,2*	*1,8*	*2,5*	*3,5*	*5*	*7*	*10*	*14*
1000	*1600*	*0,7*	*1*	*1,4*	*2*	*2,8*	*4*	*5,5*	*8*	*11*	*16*
1600	*2500*	*0,8*	*1,1*	*1,6*	*2,2*	*3,2*	*4,5*	*6*	*9*	*13*	*18*
2500	*4000*	*0,9*	*1,3*	*1,8*	*2,5*	*3,5*	*5*	*7*	*10*	*14*	*20*
4000	*6300*	*1*	*1,4*	*2*	*2,8*	*4*	*5,5*	*8*	*11*	*16*	*22*
6300	*10000*	*1,1*	*1,5*	*2,2*	*3*	*4,5*	*6*	*9*	*12*	*17*	*24*
La plus grande dimension concerne celle de la pièce usinée.											

Type de moulage	***Classe des tolérances***								
	Métaux et alliages de coulée								
	Acier	*Fonte grise*	*Fonte à graphite sphéroïdale*	*Fonte malléable*	*Alliage de cuivre*	*Alliage de zinc*	*Alliages de métaux légers*	*Alliages à base de nickel*	*Alliages à base de cobalt*
Moulage en sable à la main	11 à 14	11 à 14	11 à 14	11 à 14	10 à 13	10 à 13	9 à 12	11 à 14	11 à 14
Moulage en sable mécanique et moulage en carapace	8 à 12	8 à 12	8 à 12	8 à 12	8 à 10	8 à 10	7 à 9	8 à 12	8 à 12
Moulage en coquille par gravité/basse pression	Le travail est en cours pour affiner les valeurs appropriés. Il convient que des consultations aient lieu entre le modeleur et le client afin de se mettre d'accord sur les données à utiliser.								
Moulage en coquille sous pression									
Moulage de précision									

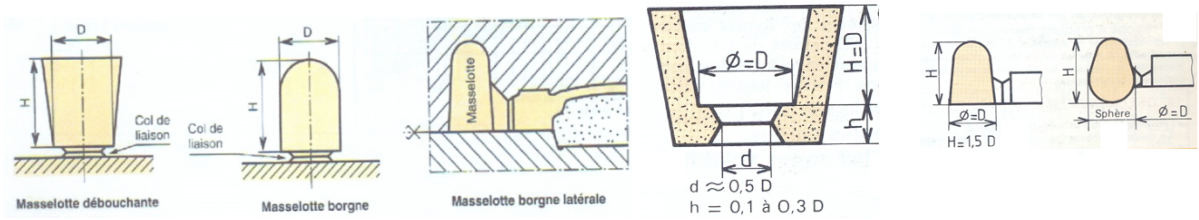
Tolérances de moulage																	
Cote la plus large (mm)		*Classe des tolérances dimensionnelles*															
Au dessus de	*Jusqu'à et y compris*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
-	*10*	0,09	0,13	0,18	0,26	0,36	0,52	0,74	1	1,5	2	2,8	4,2	-	-	-	-
10	*16*	0,1	0,14	0,2	0,28	0,38	0,54	0,78	1,1	1,6	2,2	3	4,4	-	-	-	-
16	*25*	0,11	0,15	0,22	0,3	0,42	0,58	0,82	1,2	1,7	2,4	3,2	4,6	6	8	10	12
25	*40*	0,12	0,17	0,24	0,32	0,46	0,64	0,9	1,3	1,8	2,6	3,6	5	7	9	11	14
40	*63*	0,13	0,18	0,26	0,36	0,5	0,7	1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	10	12	16
63	*100*	0,14	0,2	0,28	0,4	0,56	0,78	1,1	1,6	2,2	3,2	4,4	6	9	11	14	18
100	*160*	0,15	0,22	0,3	0,44	0,62	0,88	1,2	1,8	2,5	3,6	5	7	10	12	16	20
160	*250*	-	0,24	0,34	0,5	0,7	1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	14	18	22
250	*400*	-	-	0,4	0,56	0,78	1,1	1,6	2,2	3,2	4,4	6,2	9	12	16	20	25
400	*630*	-	-	-	0,64	0,9	1,2	1,8	2,6	3,6	5	7	10	14	18	22	28
630	*1000*	-	-	-	-	1	1,4	2	2,8	4	6	8	11	16	20	25	32
1000	*1600*	-	-	-	-	-	1,6	2,2	3,2	4,6	7	9	13	18	23	29	37
1600	*2500*	-	-	-	-	-	-	2,6	3,8	5,4	8	10	15	21	26	33	42
2500	*4000*	-	-	-	-	-	-	-	4,4	6,2	9	12	17	24	30	38	49
4000	*6300*	-	-	-	-	-	-	-	-	7	10	14	20	28	35	44	56
6300	*10000*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	16	23	32	40	50	64

Règle 10: Tirage d'air (moulage en coquille)

L'air emprisonné dans l'empreinte doit être évacué du moule pendant le remplissage en métal de celui-ci. Le gaz provenant du métal en fusion est évacué en même temps que l'air. Au cours de la construction du moule, il faut prévoir des tirages d'air aux joints, entre les chapes. Dans le plan de joint, des canaux plats de 10mm de largeur et de 0,3mm de profondeur sont usinés.

Règle 11: Masselotte

Les masselottes sont des réserves de métal liquide destinées à nourrir la pièce durant son refroidissement et à compenser le retrait volumique que subit le métal. Au cours de la coulée, le flux de métal remplit l'empreinte et remonte dans la forme prévue pour la masselotte. Les masselottes se solidifient après la pièce: elle sont placées prés des parties massives (de la pièce). Le raccordement des masselottes avec le volume de la pièce doit permettre un bon approvisionnement en métal liquide. Une attaque de masselotte trop étroite ou trop longue se refroidit trop rapidement, elle ne remplit plus son orifice efficacement. On distingue les masselottes débouchantes (nommée encore exothermiques), borgnes et borgnes latérales.



On emploie les masselottes borgnes lorsque les attaques sont éloignés de la partie supérieure du moule.

Afin de déterminer le masselottage optimal, il faut diviser la pièce en volumes simples et évaluer chronologiquement la solidification de ces volumes. Il faut masselotter les volumes

solidifiés en dernier lieu. Pour cette raison on calcule les modules de refroidissements de chaque volume élémentaire et qui sont données par l'expression suivante:

$$MR = \frac{V}{S} = \frac{Volume\ d'une\ partie\ de\ la\ pièce}{Surface\ de\ refroidissement\ cette\ partie\ de\ la\ pièce} = \frac{Section\ d'une\ partie\ de\ la\ pièce}{Périmètre\ de\ refroidissement\ cette\ partie\ de\ la\ pièce}$$

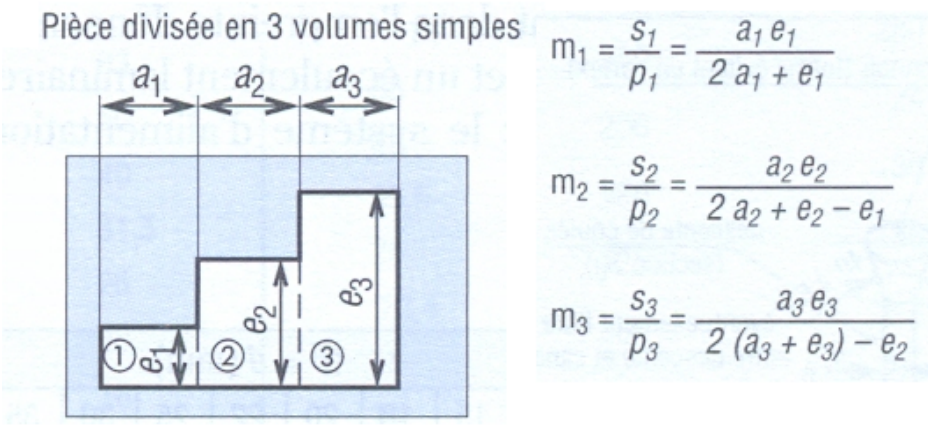
Ces derniers doivent être croissants vers la masselotte. Il faut faire le choix du sens de moulage et du système de remplissage afin de diriger la solidification et disposer des attaques de coulée dans la masselotte si c'est possible. La portion de la pièce qui dispose du module de refroidissement le plus important est refroidie la dernière, donc la masselotte doit être placée sur cette zone.

Pour déterminer le volume de la masselotte V_m afin de combler le déficit volumique de la partie de la pièce alimentée par la masselotte (de volume V_p), on doit se servir de l'expression:

$$\eta V_m = r\, V_p$$

η est le rendement de la masselotte, il est de 1/6 pour une masselotte débouchante et de 1/2 pour une masselotte borgne, r étant le retrait donné par le tableau suivant:

Alliage		***Valeurs prises en compte pour réaliser les systèmes d'alimentation en alliage liquide en %***
Alliages d'aluminium	***et de cuivre***	7 à 8
	et de Magnésium	7 à 8
	et de Silicium	3,5 à 5
	et de Zinc	8
Alliages de cuivre	***Cupro-aluminium***	4
	Bronzes	4,5
	Laiton	6,5
	Laiton haute résistance	7,5
Alliages ferreux	***Aciers moulés non alliés***	5 à 7
	Aciers moulés alliés	7 à 10
	Fonte GL	0,5 à 3
	Fonte GS	3 à 6
	Fonte alliée	6 à 8
Alliages de magnésium		4
Alliages de zinc		5

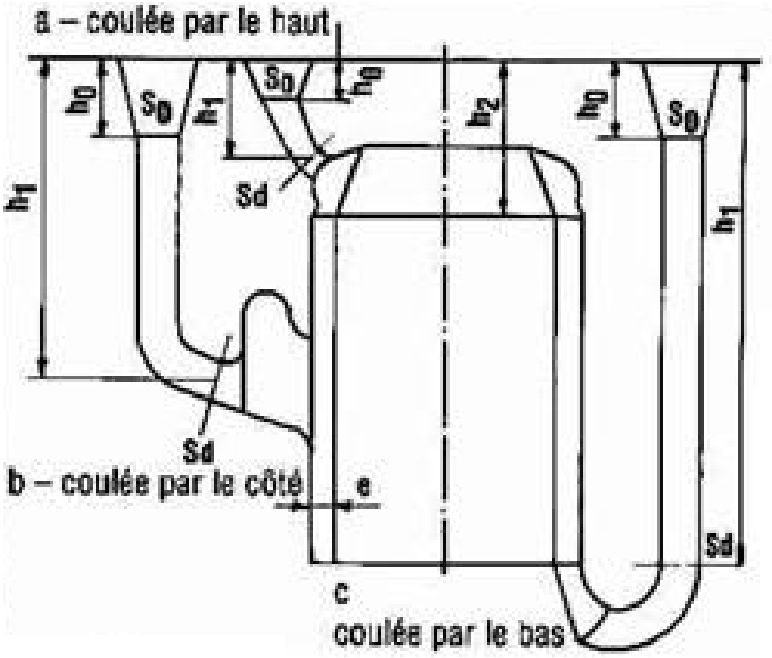


***Règle 12*:** Dimensionnement du dispositif de coulée

Le trou de coulée doit être placée sur la zone qui dispose du module de refroidissement le plus faible. Le métal pendant sa descente est ralenti par la forme du système de coulée. Les sections rétrécies entraînent des pertes de charges qui sont évaluées à:

Coulée par le haut	0,7
Coulée par le côté	0,4
Coulée par le bas	0,4
Coulée des pièces plates	0,25

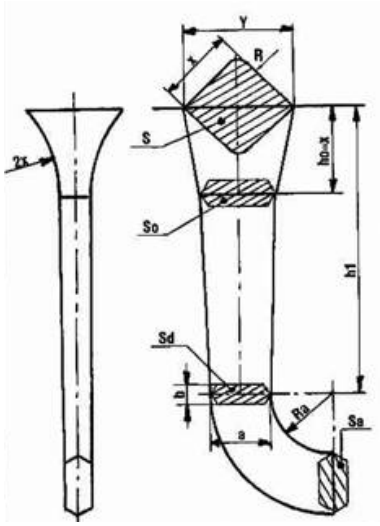
* La coulée par le haut s'adresse aux pièces de faible hauteur,
* la coulée par le côté est destinée aux pièces de hauteur moyenne.
* et la coulée par le bas est destinée aux pièces de hauteur importante.



La plus petite section transversale d'un système de coulée est calculée comme suit:

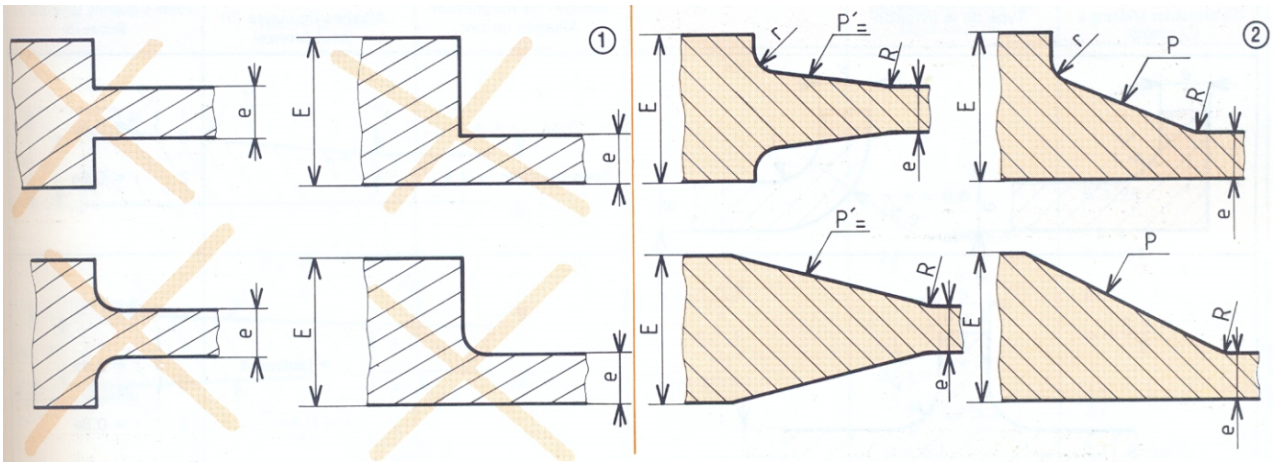
Section théorique S'_d en chute par le haut	***Section pratique S_d***
$S'_d = \frac{V}{0{,}7t\left(\sqrt{2gh_1}\right)}$	Choisir a et b depuis la figure ci-dessous après calcul de S'_d $S = 2S_d\sqrt{h_1}$ $\quad a = \sqrt{3S_d}$ $h_0 = x = \sqrt{S}$ $\quad Y = \sqrt{2x}$ $h = \sqrt{\frac{S_d}{3}}$ $\quad r = \frac{b}{2}$ $S_0 = S_d\sqrt{\frac{h_1}{h_0}}$ $\quad S_a = 2$à $4\,S_d$ $R = \frac{x}{4} = a$ $\quad$ Si $S'_d > 3cm^3$ prévoir plusieurs trous de coulée
Section théorique S'_d en côté ou en bas	
$S'_d = \frac{V}{0{,}4t\left(\sqrt{g(h_1 + h_2)}\right)}$ h_1: hauteur de la descente de coulée t: temps de remplissage en seconde 0,7 ou 0,4: coefficient de perte de charge V: volume total de l'empreinte g: pesanteur	

S'd (cm²)	a (mm)	b (mm)	Sd/S'd
0,3	12	4	1,6
0,5	15	5	1,5
0,8	18	66	1,35
1,1	21	7	1,35
1,5	24	88	1,28
2	27	9	1,21
2,5	30	10	1,20
3	33	11	1,20
3,66	36	12	1,20
4,2	39	13	1,20
5,5	42	14	1,06
6,3	45	15	1,06

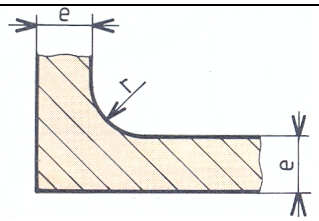


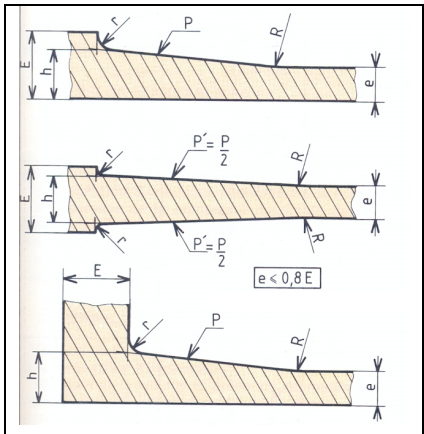
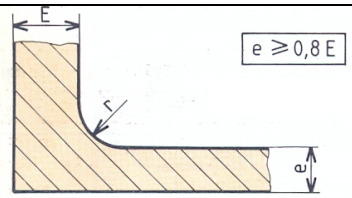
***Règle 13*:** Tracé des parois

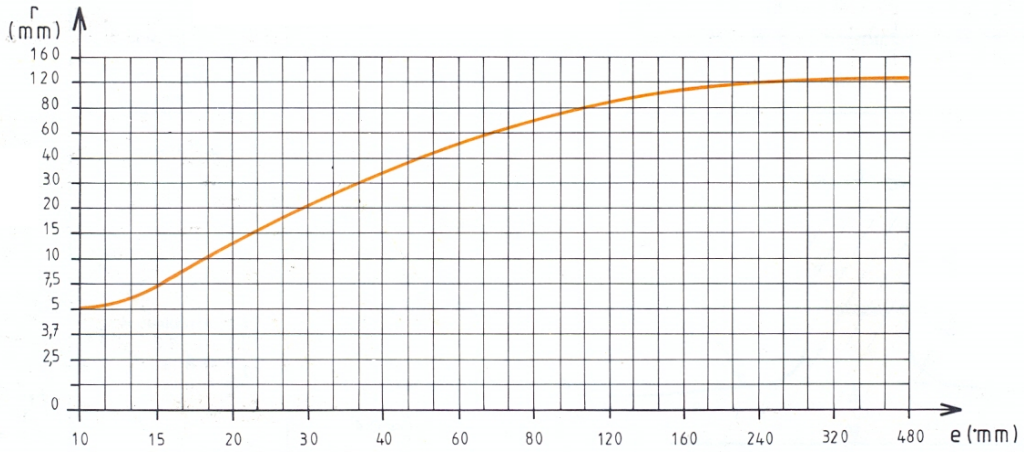
La règle principale à respecter est qu'on ne doit pas avoir de variation brusque d'épaisseur (l'accroissement de masse doit être progressif). En effet, cela provoquerait des contraintes internes lors du refroidissement, empêche un écoulement optimal de la matière et crée un point de fragilité sur la pièce. On évitera donc les tracés de la figure 1.



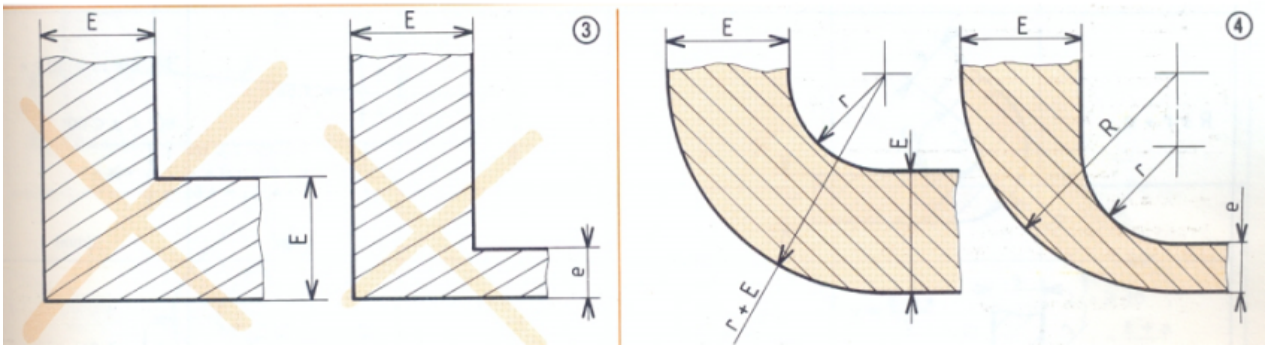
Les pentes et les rayons de raccordement sont définis par le tableau suivant:

Tracé	*Alliages d'aluminium* *Alliages de magnésium* *Alliages de zinc*	*Aciers moulés (1)* *Cupro-aluminium (2)* *Alliages de cuivre (3)* *Sauf bronze*	*Fontes GL (1)* *Fontes GS (2)* *Bronze (3)*
	0,4e < r ≤ e Sous-pression : r ≥ e	1, 2, 3 } r = e	1, 3 } r = 0,4e 2 : r = 0,8e

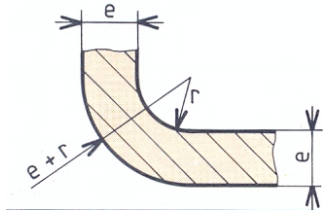
	$h = \frac{e + E}{2}$ $r = \frac{e + E}{2}$ $p = 20\ \%$ $R = 5\ E$	1 h = 0,6 E 2 r → Courbe p = 15 % 3 $h = \frac{e + E}{2}$ $r = \frac{e + E}{2}$ p = 20 % R = 5 E	E ⩾ 25 : r ⩾ 4 R = 5 E p = 10 % $h = \frac{E + e}{2}$ 1 3 r = 0,3 E 2 r = 0,8 E (mm)
	r = e Sous-pression : $0,5 \leqslant \frac{e}{E} \leqslant 0,6$	1 2 3 r → Courbe	E < 25 r ⩾ 4 1 3 r = 0,4 E 2 : r = 0,8 E mm



Règle 14: Tracé d'un raccordement d'angle en forme de "L"

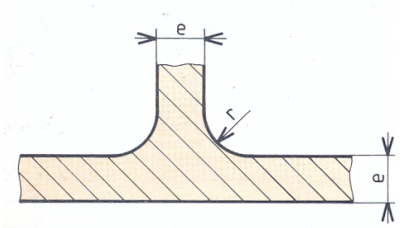
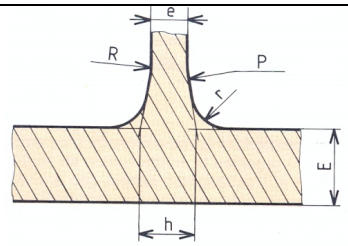
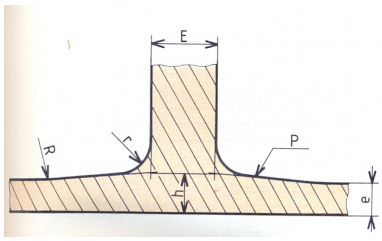
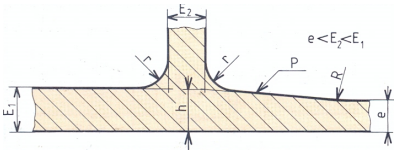


- Si le raccordement dispose de la même épaisseur en entrée et en sortie (1er cas), il faut choisir le rayon de raccordement "r" comme indiqué dans le tableau ci-dessous et faire le tracé des 2 rayons (r et r+E) en partant du même centre.

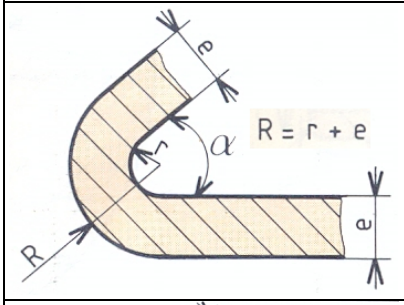
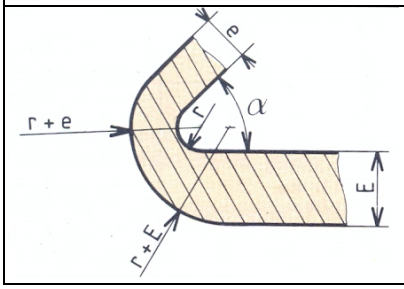
Tracé	*Alliages d'aluminium* *Alliages de magnésium* *Alliages de zinc*	*Aciers moulés (1)* *Cupro-aluminium (2)* *Alliages de cuivre (3)* *Sauf bronze*	*Fontes GL (1)* *Fontes GS (2)* *Bronze (3)*
	$0{,}4e < r \leqslant e$ Sous-pression : $r \geqslant e$	1, 2, 3 : $r = e$	1, 3 : $r = 0{,}4e$ 2 : $r = 0{,}8e$

- Si les deux parois ne disposent pas de la même épaisseur, il faut ajouter la condition de tangence sur les bords et faire le traçage des deux rayons de raccordement qui ne disposent pas du même centre.

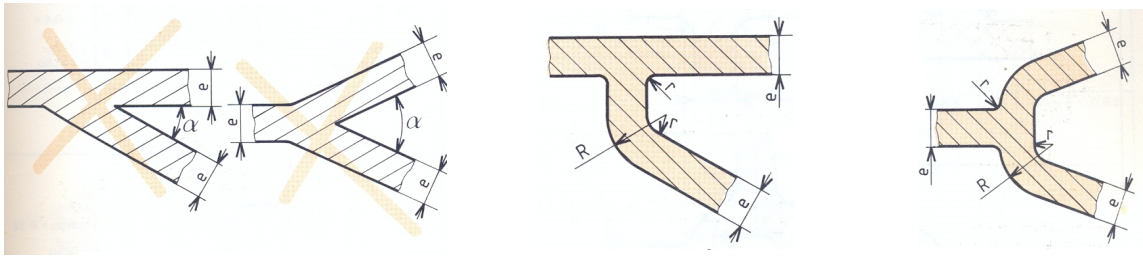
Règle 15: Tracé d'un raccordement d'angle en forme de "T"

Tracé	*Alliages d'aluminium* *Alliages de magnésium* *Alliages de zinc*	*Aciers moulés (1)* *Cupro-aluminium (2)* *Alliages de cuivre (3)* *Sauf bronze*	*Fontes GL (1)* *Fontes GS (2)* *Bronze (3)*
	$r = e$	1, 2 : $r \rightarrow$ Courbe 3 : $r = 0{,}4e$	1, 3 : $r = 0{,}4e$ 2 : $r = 0{,}8e$
	$e < 0{,}6\,E$: $r = e$ $h = \frac{E+e}{2}$ $p = 10\,\%$ sous-pression : $p = 0$ $e > 0{,}6\,E$: $p = 0$	$E > 25$ ou $e < 0{,}6\,E$ $h = \frac{E+e}{2}$ 1 : $r \rightarrow$ Courbe, $h = 0{,}6\,E$ 2 : $p = 8\,\%$, $R = 5\,E$ 3 : $r = 0{,}3\,E$, $P = 10\,\%$, $R = 10\,E$ $e > 0{,}6\,E$: $p = 0$ (mm)	$E > 25$ ou $e < 0{,}6\,E$ $h = \frac{E+e}{2}$ 1 : $r = 0{,}3\,E$ 2 : $p = 10\,\%$ 3 : $r = 0{,}8\,E$, $p = 10\,\%$ $e > 0{,}6\,E$: $p = 0$ (mm)
	$E \geqslant 1{,}6\,e$ $r = e$ $h = \frac{e+E}{2}$ $p = 20\,\%$ $R = 5\,e$ Sous-pression : $P = 0$ $0{,}3 \leqslant \frac{e}{E} \leqslant 0{,}4$	$E \geqslant 1{,}6\,e$ 1, 2, 3 : $r \rightarrow$ Courbe, $h = 0{,}6\,E$, $P = 8\,\%$, $R = 5\,E$	$E \geqslant 1{,}6\,e$ $h = \frac{E+e}{2}$ $p = 20\,\%$ $R = 10\,E$ 1, 3 : $r = 0{,}3\,E$ 2 : $r = 0{,}8\,E$
	$h = \frac{E+e}{2}$ $p = 20\,\%$ $R = 5\,E_1$ $r = e$	$E_1 > 25$ mm 1 : $r \rightarrow$ Courbe, $h = 0{,}6\,E_1$ 2 : $p = 8\,\%$, $R = 5\,E$ 3 : $r = 0{,}4\,E_1$, $h = \frac{e+E}{2}$, $p = 20\,\%$, $R = 5\,E$	$h = \frac{E_1+e}{2}$ $p = 20\,\%$ $R = 5\,E_1$ 1, 2 : $r = 0{,}4\,E_1$ 3 : $r = 0{,}8\,E_1$

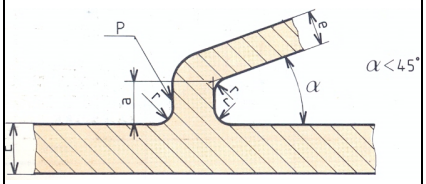
Règle 16: Tracé d'un raccordement d'angle en forme de "V"

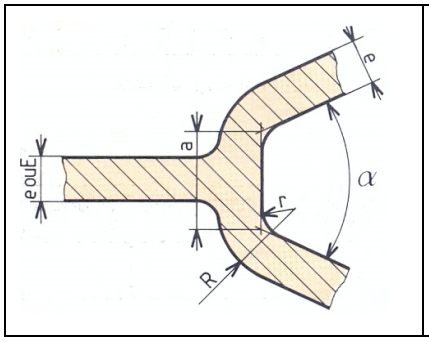
Tracé	*Alliages d'aluminium* *Alliages de magnésium* *Alliages de zinc*	*Aciers moulés (1)* *Cupro-aluminium (2)* *Alliages de cuivre (3)* *Sauf bronze*	*Fontes GL (1)* *Fontes GS (2)* *Bronze (3)*
	r = e	1, 2 } r = 1,5e 3 { α < 60° : r ≥ 10 60° < α < 90° : r ≥ e e > 40 : r = 1,5 (mm)	α < 60° : r > 10 > e 60° < α < 90° 1, 2, 3 } r ≥ e (mm)
	$r = \frac{E + e}{2}$	$r = \frac{E + e}{2}$	1 α < 60° : 2 r ≥ 10 3 $r = \frac{E + e}{2}$ (mm)

Règle 17: Tracé d'un raccordement d'angle en forme de "Y"

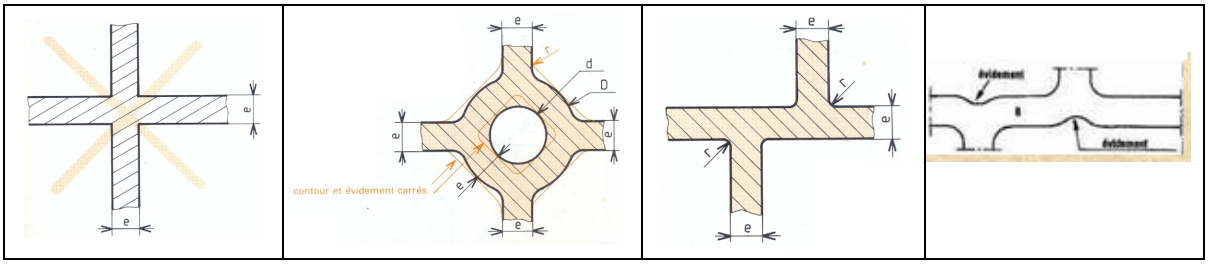


Il faut modifier la géométrie pour éviter l'accumulation d'une masse importante de métal.

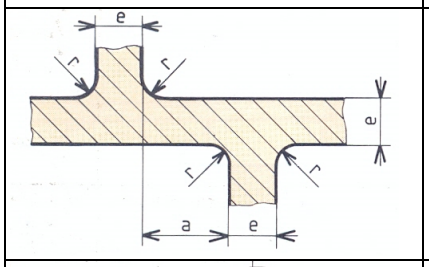
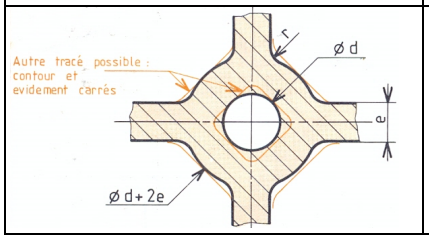
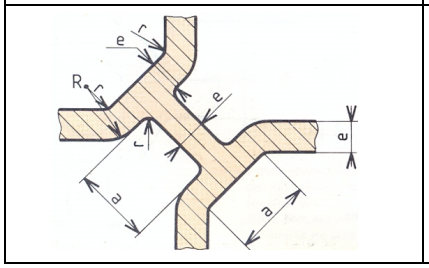
Tracé	*Alliages d'aluminium* *Alliages de magnésium* *Alliages de zinc*	*Aciers moulés (1)* *Cupro-aluminium (2)* *Alliages de cuivre (3)* *Sauf bronze*	*Fontes GL (1)* *Fontes GS (2)* *Bronze (3)*
	a ≥ E + e p = 10 % a ≥ E + e r = e	a ≥ E + e 1 { r → Courbe 2 { p = 15 % 3 { r = 0,3 E p = 10 %	a ≥ E + e p ≥ 10 % a ≥ E + e 1, 2 { r = 0,3 E 3 : r = 0,8 E

	e < E a = o possible → r > e R = r + e	e = E : a ≥ 4 e 1 r = e 2 R = 2 e e < E : 3 a = o possible → r > e	e = E : idem aciers e < E : a = o possible E < 25 mm et e > 0,6 E r ≥ e R = r + e α < 60° → r ≥ 10 1 3 r = 0,3 E 2 : r = 0,8 E E > 25 mm ou e < 0,6 E r ≥ e, R = r + (E + r)/2 α < 60° → r ≥ 10 mm

Règle 18: Tracé d'un raccordement d'angle en forme de "X"

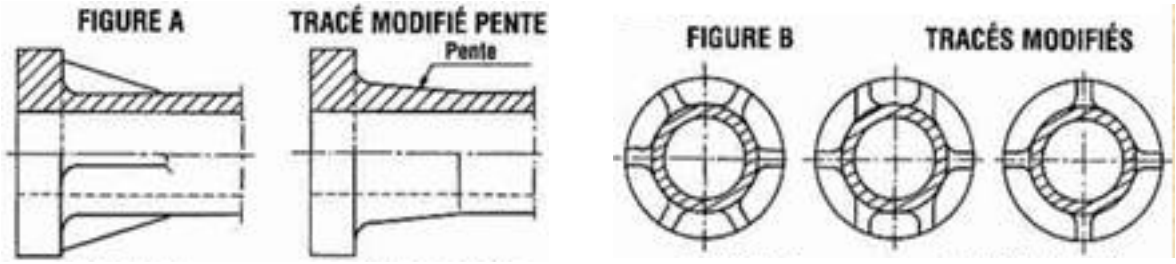


L'accumulation de matière à l'intersection est néfaste. Il faut donc éviter cette conception et suivre les consignes du tableau:

Tracé	*Alliages d'aluminium* *Alliages de magnésium* *Alliages de zinc*	*Aciers moulés (1)* *Cupro-aluminium (2)* *Alliages de cuivre (3)* *Sauf bronze*	*Fontes GL (1)* *Fontes GS (2)* *Bronze (3)*
	a ≥ 2e r = e Sous-pression : a = O possible	1 2 a ≥ 2e r → Courbe 3 a ≥ 2e r = e	1 2 a ≥ 2e r = 0,4 e 3 a ≥ 2e r = 0,8e
	r = e	parois e ≥ 12 1 2 3 d ≥ 4e r → Courbe (mm)	parois e ≥ 12 1 2 3 d ≥ 20 r = 0,25e (mm)
	a ≥ 2e r = e R = 2e	1 a ≥ 4e 2 r → Courbe 3 R = r + e	a ≥ 25 R = 1,3e 1 2 r = 0,3e 3 : r = 0,8e (mm)

- Pour affiner le tracé et atténuer l'effet de masse, il est préférable de créer de légères ondulations au niveau des raccordements (figure 4 du tracé en forme de X).

Règle 19: Tracé des nervures



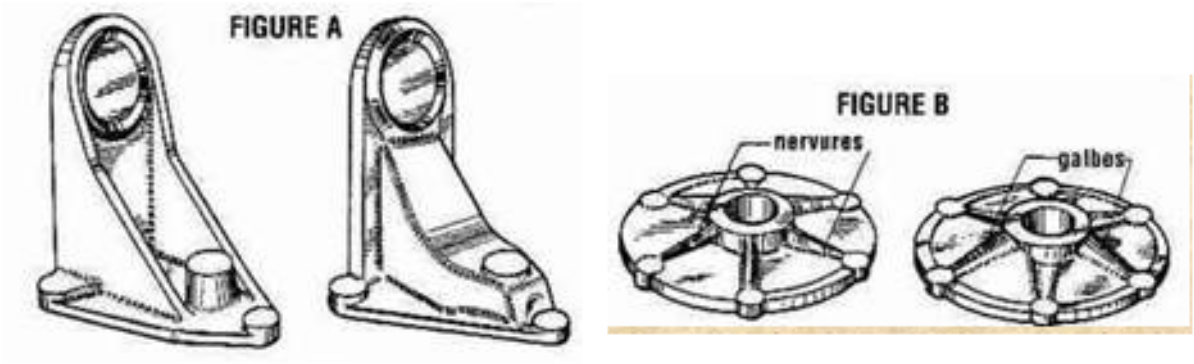
La présence de nervures provoque des soucis dans le démoulage. Pour pallier à ce problème, on cherche à éliminer les formes en contre dépouille. De plus, on peut étudier la possibilité d'augmenter l'épaisseur générale de la pièce pour pouvoir se passer des nervures pour la résistance mécanique. Ainsi, il faut:

- remplacer les nervures non démoulables par une forme tronconique.

-remplacer les 6 nervures de la figure 2 par 4 nervures plus faciles à démouler ou 6 nervures orientées différemment.

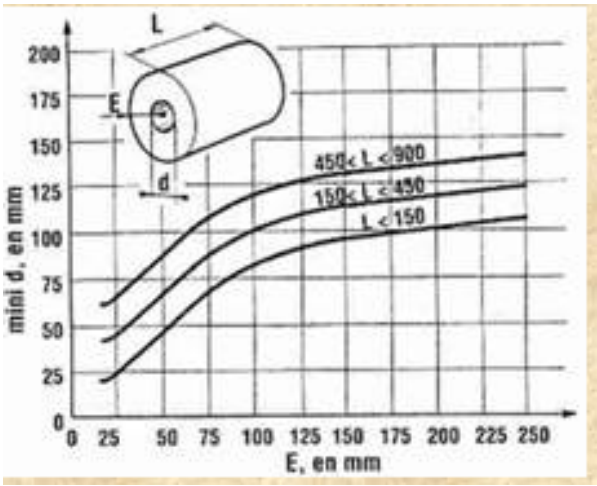
Pour les équerres de grandes dimensions, on peut remplacer les nervures par un caisson. La résistance mécanique est quasiment identique mais la pièce est plus facile à réaliser. Pour respecter la règle des épaisseurs constantes, il faut que le caisson soit creux.

Les nervures de sections rectangulaires peuvent être remplacées par des nervures de forme galbées (demi-ovales): l'écoulement du matériau est meilleur et la variation d'épaisseur est moins brusque.

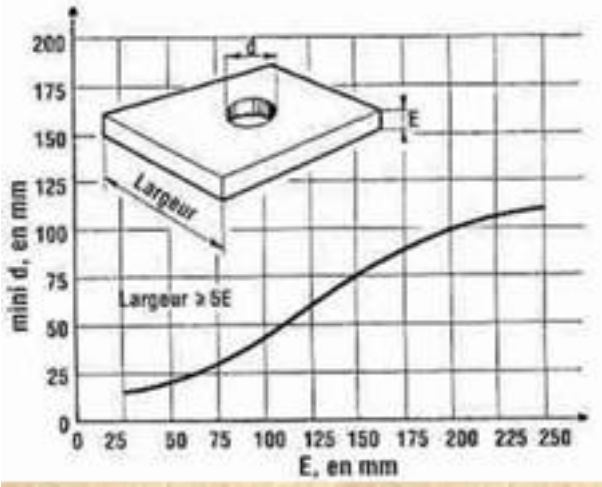


Règle 20: Dimension des trous et alésages

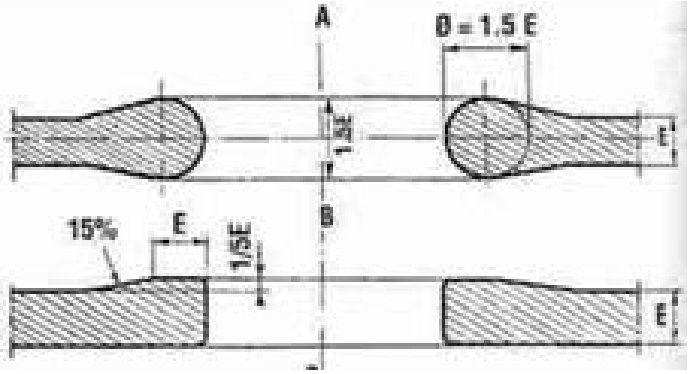
Les alésages bruts de fonderie sont obtenus à l'aide de noyaux pour le moulage en sable et à l'aide de broche pour le moulage en coquille. Les noyaux réalisés en matière réfractaire sont fortement sollicités au moment de la coulée. Il doivent donc avoir des dimensions minimales. L'avantage des noyaux en sable est qu'ils sont détruits lors du décochage. On n'aura donc pas besoin de respecter un angle de dépouille pour ces pièces. La figure suivante permet de connaître le diamètre minimal réalisable en fonction de l'épaisseur de la matière et de la profondeur de l'alésage.



Pour les trous, le diamètre minimal réalisable par fonderie dans une parois dont la longueur est au moins 5 fois l'épaisseur, est déterminé d'après le graphique suivant:

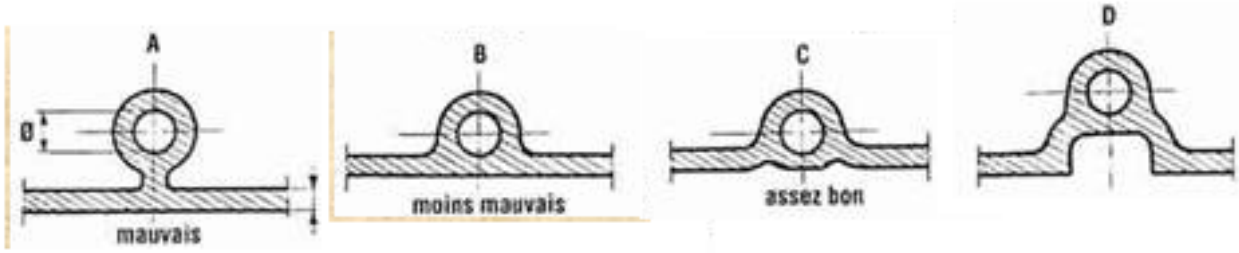


Dans le cas où les plaques trouées sont fortement sollicitées, les contraintes s'accumulent aux points de faiblesse et notamment les perçages. On modifie donc la géométrie de la pièce prés de ces zones de faiblesse pour les renforcer.

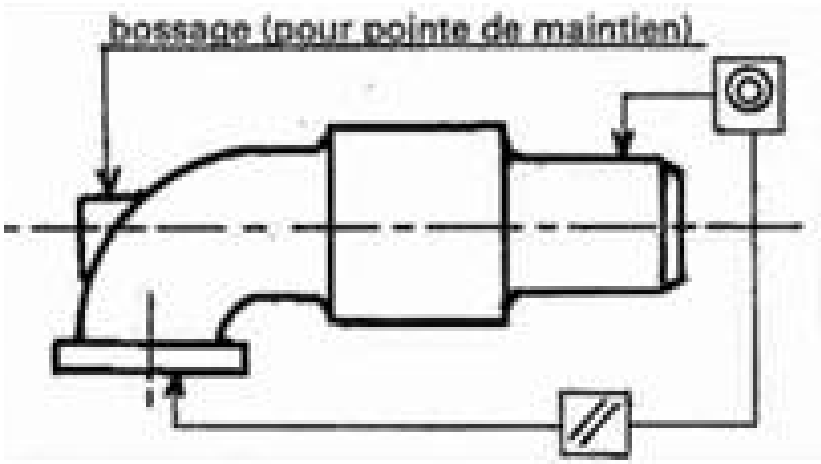


***Règle 21*:** Tracé des bossages

Les bossages sont la plupart du temps crées pour permettre le montage des vis ou autre. Il faut donc créer un trou entouré de matière avec un profil supérieur apte à recevoir une tête de vis. On va, néanmoins, chercher à réduire la masse de métal utilisée pour alléger la pièce et veiller à ce que la concentration de matière ne soit pas trop prononcée.



C et D: tracés qui favorisent un refroidissement homogène sans apparition de contraintes

Règle 22: Modification pour faciliter l'usinage

On doit ajouter un bossage en bout de la pièce pour faciliter son montage entre pointes et satisfaire la contrainte géométrique.