

Les procédés d'obtention de pièces métalliques moulées

Table des matières

1 Procédés de moulage.....	4
1.1 Introduction.....	4
1.2 Données économiques.....	4
1.3 Métaux et alliages fusibles usuels.....	5
1.4 Vocabulaire technique utilisé en fonderie.....	6
1.5 Types de moulage.....	7
1.6 Traitement thermique des pièces moulées.....	7
1.6.1 Modifications recherchées	8
1.6.2 Traitements appliqués.....	8
1.6.2.1 Stabilisation.....	8
1.6.2.2 Recuit de normalisation.....	8
1.6.2.3 Durcissement (trempe et revenu).....	9
1.6.2.4 Malléabilisation.....	9
2 Conception des pièces moulées.....	10
2.1 Introduction.....	10
2.2 Poids des pièces.....	10
2.3 Epaisseur des pièces.....	10
2.4 Tracé des parois.....	11
2.5 Tracé d'un raccordement d'angle.....	12
2.6 Tracé des nervures.....	14
2.7 Dimension des trous et alésages.....	15
2.8 Tracé des bossages.....	16
2.9 Etat de surface.....	17
2.10 Retrait.....	17
2.11 Déformations dues au retrait.....	17
2.12 Défaut de positionnement des surfaces.....	17
2.13 Surépaisseurs d'usinage.....	18
2.14 Modifications pour amélioration de résistance.....	18
2.15 Modifications pour simplification du moulage.....	18
2.16 Modifications pour faciliter l'usinage.....	18
3 Moulage avec moule permanent.....	19
3.1 Généralités.....	19
3.2 Moulage en coquille par gravité.....	19
3.2.1 Généralités.....	19
3.2.2 Conception d'une coquille.....	20
3.2.2.1 Matériaux utilisés pour les moules.....	20
3.2.2.2 Le moule.....	20
3.2.2.3 Positionnement de la pièce dans le moule.....	20
3.2.2.4 Détermination du plan de joint.....	21
3.2.2.5 Eléments constitutifs d'un moule	21
3.2.2.6 Verrouillage des moules.....	23
3.2.3 Conception du système d'alimentation et des masselottes.....	24
3.2.3.1 Systèmes d'alimentation.....	24
3.2.3.1.1 Coulée par le haut (coulée en chute).....	24
3.2.3.1.2 Coulée sur le coté (coulée latérale).....	24
3.2.3.1.3 Coulée par le bas (coulée source).....	24
3.2.3.2 Masselottes.....	24
3.2.3.2.1 Rôle.....	24
3.2.3.2.2 Raccordement des masselottes.....	25
3.2.3.2.3 hauteur des masselottes.....	25
3.2.3.3 Tirages d'air.....	25
3.2.3.4 Réalisation des noyaux et des broches.....	25
3.2.3.4.1 Utilisation.....	25
3.2.3.4.2 Noyaux métalliques.....	26
3.2.3.4.3 Noyaux en sable.....	26
3.2.3.4.4 Broches.....	26
3.2.3.4.5 Dimensions des broches.....	26
3.2.3.4.6 Dimensions des trous borgnes.....	26
3.2.3.5 Détermination du dispositif de coulée.....	27
3.2.3.5.1 Module de refroidissement	27
3.2.3.5.2 Dimensionnement de la masselotte.....	28
3.2.3.5.3 Calcul du système de coulée	29
3.2.3.5.4 Application : Pièce CPEF du CERTA.....	30
3.2.4 Pièces obtenues.....	33
3.2.4.1 Précision dimensionnelle.....	33
3.2.4.2 Surépaisseur d'usinage.....	33

3.2.4.3 Dépouille.....	33
3.2.4.4 Trous.....	33
3.3 Moulage en coquille sous haute pression.....	34
3.3.1 Généralités.....	34
3.3.2 Machines à mouler sous pression.....	34
3.3.3 Moule.....	35
3.3.4 Possibilités techniques.....	39
3.3.4.1 Tolérances générales.....	39
3.3.4.2 Epaisseur des parois.....	39
3.3.4.3 Trous de petit diamètre.....	39
3.3.4.4 Dépouilles	40
3.3.4.5 Petites pièces.....	40
3.4 Moulage en coquille sous basse pression.....	40
3.4.1 Généralités.....	40
3.4.2 Machines.....	40
3.4.3 Moules.....	41
3.4.4 Possibilités techniques.....	42
3.4.4.1 Précision.....	42
3.4.4.2 Conception.....	43
3.4.5 Comparatif des différents procédés.....	43
4 Moulage avec moule non permanent.....	43
4.1 Moulage au sable.....	43
4.1.1 Principe.....	43
4.1.2 Utilisation	44
4.1.3 Remarques complémentaires.....	44
4.2 Moulage à la cire perdue.....	44
4.2.1 Principe.....	44
4.2.2 Utilisation.....	46
4.2.3 Remarques complémentaires.....	46
4.3 Moulage en carapace (procédé Croning).....	47
4.3.1 Principe.....	47
4.3.2 Utilisation.....	49
4.3.3 Remarques complémentaires.....	49
4.4 Etude des noyaux.....	49
4.4.1 Principe.....	49
5 Bibliographie.....	51

Fiches de synthèse

Procédé : Moulage en coquille par gravité.....	52
Principe du procédé :.....	53
Utilisation :.....	53
Capabilités :.....	53
Critères de conception :.....	53
Procédé : Moulage au sable.....	54
Principe du procédé :.....	54
Utilisation :.....	54
Capabilités :.....	54
Particularités du procédé :.....	54
Critères de conception :.....	54
Procédé : Moulage à la cire perdue.....	55
Principe du procédé :.....	55
Utilisation :.....	55
Capabilités :.....	55
Particularités du procédé :.....	55
Critères de conception :.....	55

1 Procédés de moulage

1.1 Introduction

Le moulage est un procédé d'obtention de pièces brutes qui consiste à couler par gravité ou sous pression, du métal fondu, obtenu par chauffage dans un four, dans un moule présentant une empreinte. Après solidification et refroidissement de l'alliage, on obtient les formes et les dimensions de la pièce souhaitées.

1.2 Données économiques

Principaux pays	Métaux ferreux	Métaux non ferreux	Total
Chine (Rep. Populaire).....	13 752	1 137	14 889
Etats-Unis.....	9 355	2 516	11 871
Russie.....	5 600	600	6 200
Japon.....	4 544	1 297	5 841
Allemagne.....	3 801	850	4 651
Inde.....	2 925	230	3 155
France.....	2 158	395	2 553
Italie.....	1 433	960	2 393
Brasil (1996).....	1 611	155	1 766
Corée.....	1 614	99	1 683
Ukraine.....	1 296	73	1 369
Grande-Bretagne.....	906	206	1 112
Espagne.....	956	142	1 098
Canada.....	836	76	912
Turquie.....	862	44	906
Pologne.....	673	72	745
Monde.....	57 576	10 564	68 140
Union européenne (15 membres) ...	10 376	2 786	13 162

Encadré 1 – Panorama 2002

- **Production** de 2,513 Mt :
 - dont alliages ferreux : 2,123 Mt ;
 - alliages non-ferreux : 0,39 Mt.
- **Chiffre d'affaires** de 5,2 milliards d'euros HT :
 - fonderie de métaux ferreux : 2,7 milliards d'euros ;
 - fonderie de métaux non-ferreux : 2,5 milliards d'euros.
- **Établissements de production** : 525.
- **Effectifs** : 40 866.
- **Variation 2002/2001**
 - Production (– 1,5 %) :
 - production des métaux ferreux : – 1,5 % ;
 - production des métaux non ferreux : 1,1 %.
 - Chiffre d'affaires : – 3,3 %
 - Effectifs : – 4,5 %
- **2^o producteur européen de pièces moulées** :
 - 2^o producteur en métaux ferreux ;
 - 3^o producteur en métaux non ferreux.
- **7^o producteur mondial de pièces moulées** :
 - 7^o producteur en métaux ferreux ;
 - 7^o producteur en métaux non-ferreux.
- **Excédent commercial** : 574 millions d'euros.
- **Variation excédent commercial** : 2002/2001 : – 5 %.
- **Exportations** : 927 768 t, 1,31 milliard d'euros (hors fonderies intégrées).

Les dernières statistiques datent de 2001. On constate que la France se classe au 7^{ème} rang mondial et au 2^{ème} rang européen des producteurs de pièces moulées.

Confrontées à la montée en puissance des productions asiatiques et la stagnation du marché européen, les chiffres de production baissent régulièrement depuis 2000 (environ 2% par an). Toutefois la balance commerciale (différence entre importations et exportations) reste excédentaire d'environ 600 M€ mais subit une baisse de 5%. En effet la plupart des biens exportés (voitures, avions, ...) comportent des pièces de fonderie.

Fabrications sur catalogue						
Cuisine et chauffage domestique.....	ménages					
Fontes sur album.....	ménages et bâtiment					
Fontes d'hydraulique.....	voirie et bâtiment					
Fabrications sur modèles par marchés clients (en % du tonnage produit)						
Secteur	Fontes nodulaires	Fontes lamellaires	Acier moulé	Alliages cuivreux (1)	Alliages légers (1)	Moulages sous pression
Automobile, cycles, motocycles.....	70,0	48,4	10,8	16,7	90,6	77,0
Machines et tracteurs agricoles.....	3,3	4,7	1,4	0,3	0,2	0,0
Matériel ferroviaire.....	0,4	1,0	3,8	1,4	0,1	0,0
Constructions navale et aéronautique.....	1,8	0,7	1,5	6,3	0,6	0,0
Constructions électrique et électromécanique.....	2,0	0,6	0,9	3,2	2,2	5,6
Appareils ménagers.....	0,1	3,5	0,0	0,2	0,3	1,5
Machines-outils.....	1,2	2,2	0,1	1,9	0,6	1,3
M.T.P.S. (y compris cylindres de laminoirs et lingotières).....	6,2	30,9	54,9	6,5	0,7	0,0
Travail de métaux (serrurerie - quincaillerie).....	0,0	0,3	0,3	5,9	0,5	4,5
Robinetterie, raccords, pompes, compteurs.....	3,8	2,3	9,9	37,5	0,4	1,1
Autres constructions mécaniques.....	2,9	3,0	2,8	2,7	1,0	1,2
Ameublement et décoration.....	0,2	0,2	0,0	1,4	0,3	1,5
Divers.....	8,1	2,2	13,6	16,0	2,5	6,3

M.T.P.S. Matériel Travaux Publics et Sidérurgie
(1) hors sous-pression

La fabrication sur catalogue, aussi appelée fonderie sur album, représente les pièces standards qui peuvent être fabriquées : radiateurs, plaques d'égout ... En 2002 cette production représentait environ 800 000 tonnes dont 700 000 pour la fonderie de bâtiment seule.

On constate que tous les secteurs sont clients. La majeure partie des fabrications, quelque soit l'alliage étant destinée au secteur automobile.

En décembre 2002, il restait 525 fonderies actives en France soit une baisse de 7% par rapport à 2001. Parmi ces fonderies, il y a 143 fonderies de moins de 10 salariés. Le rythme des fermetures s'est accéléré suite aux difficultés rencontrées dans ce secteur.

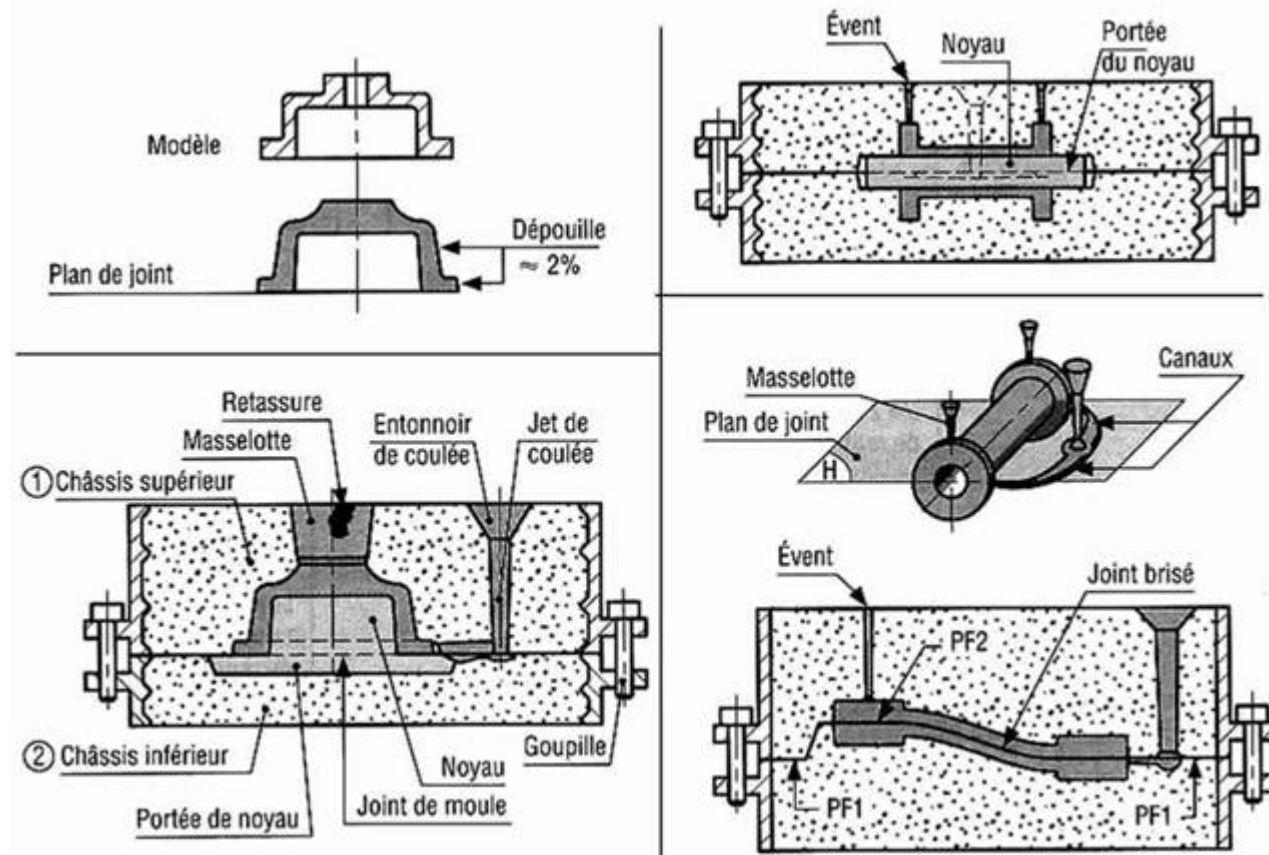
1.3 Métaux et alliages fusibles usuels

Métaux	Symbole	Température °C	Masse Volumique g/cm ³	Alliage	Composition	Température °C	Masse Volumique g/cm ³
Aluminium	Al	658	2,66	Acier	Fe + C	1 400	7,85
Argent	Ag	960	10,5	Alpax	Al + Si	600	2,68
Chrome	Cr	1 550	6,74	Bronze	Cu + Sn	900	7,8 – 8,5
Cuivre	Cu	1 090	8,9	Fonte	Fe + C	1 230	7,2
Etain	Sn	232	7,28	Laiton	Cu + Zn	940	7,3 – 8,4
Fer	Fe	1 535	7,95	Zamak	Sn + Al	420	6,6
Magnésium	Mg	649	1,74				
Or	Au	1 063	19,3				
Plomb	Pb	327	11,3				
Zinc	Zn	419	7,19				

On constate que la plupart des métaux connus sont employés. Ce qui va limiter leur utilisation c'est, en premier lieu, leur température de fusion qui conditionne les moyens mis en oeuvre pour faire fondre la matière et la capacité des moules à résister à cette chaleur lors de la coulée. Nous verrons tout cela plus en détail lors de l'étude des modes de moulage.

Les entreprises qui réalisent les opérations de fonderie sont spécialisées car le matériel est coûteux. On distinguera alors les entreprises de fonderie de fonte et aciers, matériaux cuivreux, alliages d'aluminium, alliages de zinc.

1.4 Vocabulaire technique utilisé en fonderie



Modèle : Objet destiné à être reproduit. Il est l'oeuvre du modelleur.

Moule : Corps suffisamment solide et façonné pour recevoir un métal ou un alliage en fusion (fonderie en moule permanent).

Châssis : Cadre en métal destiné à maintenir le sable comprimé autour du modèle (fonderie en moule non permanent).

Dépouille : Elle est prévue sur le modèle afin de l'extraire sans provoquer l'effritement du sable lors de sa sortie.

Masselotte : Excédent de matière qui permet de déplacer la retassure hors de la pièce.

Retassure : Principal défaut de fonderie dont la cause est due à la contraction de l'alliage lors de sa solidification.

Joint de moule (plan de joint) : Séparation entre les châssis. Une pièce peut être réalisée avec plusieurs châssis donc plusieurs plans de joint.

Noyau : Réalisé en sable, il permet d'obtenir les formes intérieures. Il est réalisé dans une boîte à noyau (fonderie en moule non permanent).

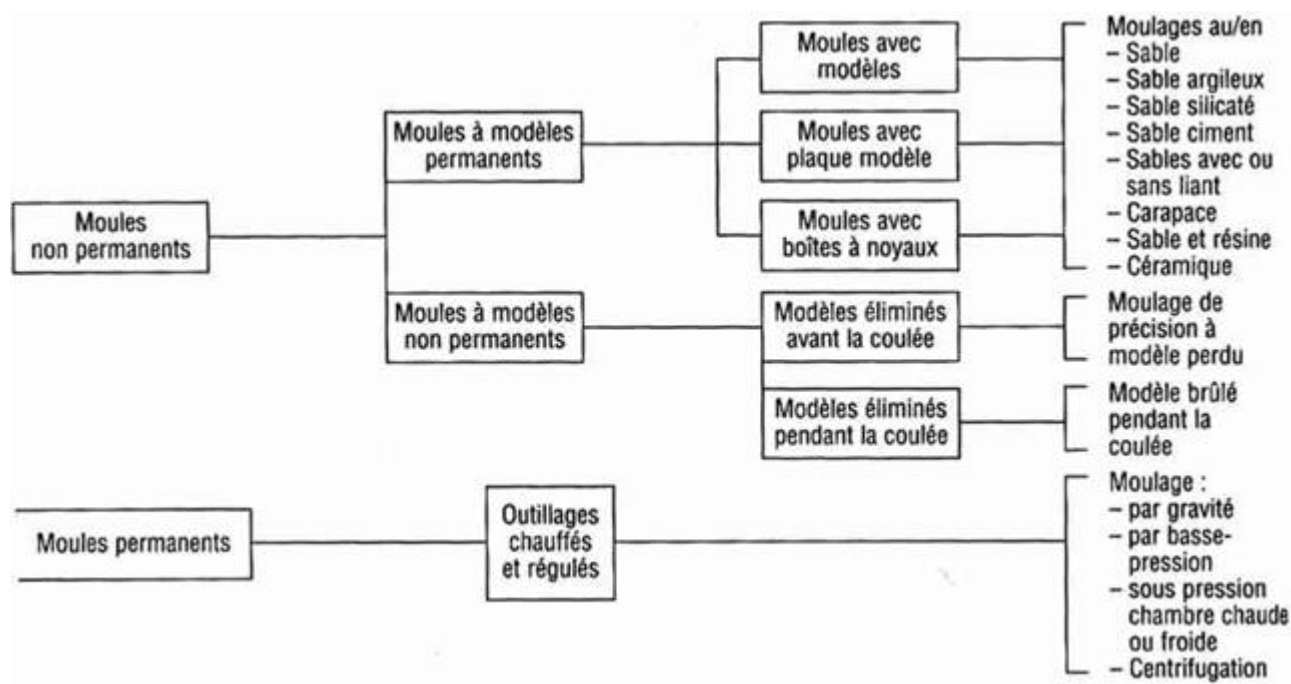
Évent : Canal destiné à faciliter l'échappement des gaz formés au moment où le métal chaud entre en contact avec la surface de l'empreinte (en incluant l'air présent dans le moule).

Décochage : Opération qui consiste à libérer la pièce du moule lorsque le métal est solidifié.

Ebarbage : Opération qui permet d'enlever les différentes parties superflues (canaux d'alimentation, masselottes, événements ...) pour obtenir la pièce brute.

Chape : Tout châssis intermédiaire entre le châssis supérieur et le châssis inférieur.

1.5 Types de moulage



Moule non permanent : Le procédé le plus classique : moulage en sable convient particulièrement pour les métaux avec un haut point de fusion (acier, fonte). Très utilisé pour les grosses pièces. Permet la production de petite série (unitaire pour moulage au trousseau) jusqu'aux grandes séries (plaque modèle métallique).

Modèle non permanent : On réalise une réplique de la pièce à fabriquer dans un matériau facile à éliminer par fusion (cire), combustion (résine), gazéification (polystyrène). On revêt cette pièce d'un enduit réfractaire (qui conserve sa forme sous l'action de la chaleur). On complète le châssis avec du sable. Le procédé est coûteux mais c'est celui qui permet d'obtenir le meilleur état de surface.

Moule permanent : Le moulage en coquille s'apparente au moulage des matières plastiques. Il est surtout utilisé pour les matériaux dont le point de fusion est inférieur à 900°C (alliage d'aluminium, de zinc, de cuivre, plastique). Le prix du moule à réaliser étant élevé, il faut produire de moyennes ou grandes séries. On distingue deux procédés principaux : le moulage par gravité et le moulage sous pression.

1.6 Traitement thermique des pièces moulées

Différents traitements thermiques peuvent être effectués sur les pièces obtenues par moulage. Le traitement approprié est fonction du matériau constitutif et la pièce et de son utilisation.

1.6.1 Modifications recherchées

On peut modifier les caractéristiques suivantes :

- structurale : forme et dimension, répartition des constituants sans changer leur nature.
- Teneur d'élément d'un alliage.
- Dureté superficielle.
- Contraintes internes.

1.6.2 Traitements appliqués

1.6.2.1 Stabilisation

- Principe :

Modification en intensité et en répartition des contraintes internes de la pièce, nées de l'anisothermie du refroidissement, sans modifier la nature des constituants : recherche d'un état physico-chimique stable du matériau qui entraîne une stabilité géométrique et structurale.

- Matériaux traités :

- Aciers : pièces soumises à de fortes sollicitations (engrenages ...) ou à des chocs thermiques (moteurs à explosion, outils ...)
- Fontes : pièces volumineuses devant avoir une grande stabilité à l'usage (éléments de machine ...)
- Alliages d'aluminium : pièces devant être usinées (impossibles à durcir), utilisées dans des conditions sévères (piston de moteur à explosion ...).
- Alliages de magnésium : pièce devant être usinée.

- Traitement effectué :

- Aciers, fontes : chauffe jusqu'à 300°C mini puis maintien en température (12 à 24h) puis refroidissement lent.
- Alliages d'aluminium : chauffe entre 150 et 350°C puis maintien en température entre 2 et 12h selon les dimensions de la pièce puis refroidissement lent.
- Alliages de magnésium : chauffe de la pièce à 250°C puis maintien en température 15 à 20h puis refroidissement lent.

1.6.2.2 Recuit de normalisation

- Principe :

Homogénéisation des structures perlitiques des aciers et des fontes. On cherche à homogénéiser la dureté.

- Matériaux traités :

- Aciers non alliés ou faiblement alliés : recherche d'une structure de perlite fine.
- Acier à faible teneur en carbone : recherche d'une structure martensitique ou bainitique.
- Fonte : réduction de la ferrite libre.

- Traitement effectué :
chauffe de la pièce entre 900°C et 1050°C durant 1 à 3h puis refroidissement à l'air calme.

1.6.2.3 Durcissement (trempe et revenu)

- Principe :
Augmentation de la dureté, de la résistance à la rupture, et en particulier de la limite élastique.
- Matériaux traités :
 - Aluminium et alliages
- Traitement effectué :
 - Homogénéisation, trempe et durcissement du matériau : chauffe de la pièce entre 450 et 600°C, durant plusieurs heures (6 à 15h); trempe par refroidissement rapide produisant une solution solide mais instable;
 - puis revenu : maintien de la pièce à environ 200°C durant plusieurs heures 5 à 15h : durcissement structurel.

1.6.2.4 Malléabilisation

- Principe :
Faciliter un usinage extérieur.
- Matériaux traités :
 - Selon le traitement appliqué, la fonte malléabilisée sera à coeur blanc, à coeur noir (graphite nodulaire ferritique), à graphite nodulaire perlitique.
 - Aluminium et alliages
- Traitement effectué :
 - Fonte à coeur blanc :
Obtenu en décarburant le matériau, par chauffe de la pièce à 1 000°C, en atmosphère contrôlée d'oxyde de carbone, durant 50 à 100h; refroidissement très lent (10°C par heure) jusqu'à 650°C et refroidissement final plus rapide (30°C par heure)
 - Fonte à coeur noir :
Obtenu en graphitisant le matériau (le carbone précipite à l'état de graphite) par chauffe de 800 à 900°C durant 10 à 20h; refroidissement très lent (3°C par heure) jusqu'à 650°C puis refroidissement rapide.
 - Fonte à graphite nodulaire perlitique :
Obtenu par une double trempe et un revenu de la pièce : chauffe à 1 000°C pendant 10 à 15h et trempe à l'air puis chauffe à 800°C durant 3 à 4h et trempe à l'huile; revenu à 650°C.

2 Conception des pièces moulées

2.1 Introduction

La qualité de la pièce obtenue dépend plus du soin pris par le concepteur dans son tracé que de la dextérité du mouleur. Une mauvaise conception entraînera dans le meilleur des cas un surcoût pour la fabrication ou une modification ultérieure de la pièce à mouler. Dans le pire des cas, cela entraînera un refroidissement irrégulier qui crée des contraintes internes et peut amener à la rupture de la pièce lors du refroidissement ou en fonctionnement. Il faut donc respecter les quelques règles ci-dessous lors de la conception.

2.2 Poids des pièces

Moules non permanents					
Fontes	Aciers	Alliages d'aluminium	Alliages de cuivre	Alliages de magnésium	Alliages de zinc
≅ 20 kg à 300 t	≅ 20 kg à 300 t	quelques kg à 3 t	quelques kg à 50 t	quelques kg à 50 kg	≅ 20 kg à 100 kg
Moules permanents					
Fontes	Aciers	Alliages d'aluminium	Alliages de cuivre	Alliages de magnésium	Alliages de zinc
≅ 100 kg à 10 t	≅ 20 kg à 10 t	quelques grammes à 50 kg	quelques kg à 10 t	≅ 10 kg à 30 kg	≅ 10 kg à 50 kg

Le poids de la pièce que l'on va pouvoir réaliser dépend de la technique de moulage, notamment moule permanent ou non, et aussi de l'alliage. Le tableau ci-contre donne un ordre de grandeur pour un couple {technique de moulage – alliage}. On constate que les possibilités s'étalent de quelques grammes à plusieurs tonnes.

2.3 Epaisseur des pièces

On conditionne les dimensions minimales et maximales des épaisseurs de la pièce.

- La **dimension minimale** est fonction de :
 - de l'alliage moulé
 - du procédé de moulage
 - des dimensions de la pièce
 - des difficultés rencontrées pour assurer un remplissage total du moule.

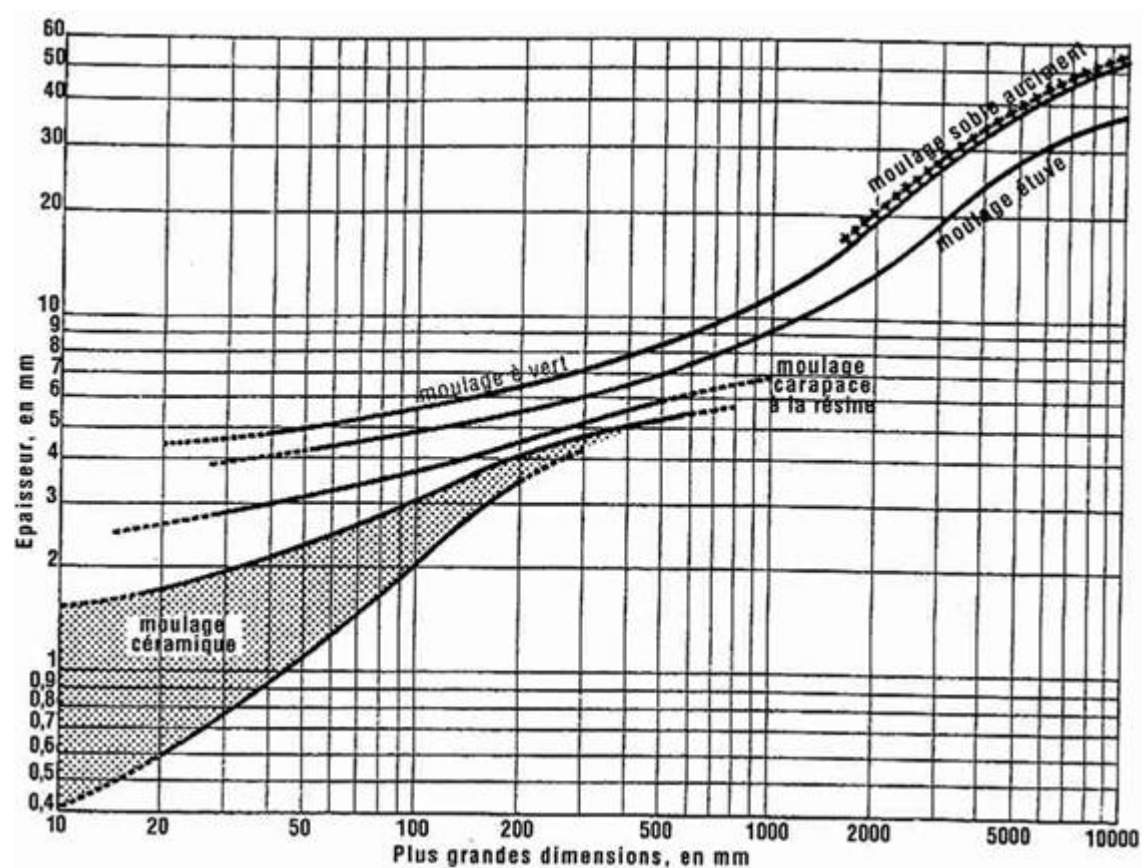
Procédé	Matériau				
	Fonte	Acier	Alliage d'Al	Alliage de Cu	Alliage de Zn
Moulage au sable	3 à 12	5 à 60	3 à 8	2,5 à 10	
Moulage en coquille			2,5 à 7	2,5 à 10	2 à 3
Moulage sous pression			0,8 à 3,5	0,8 à 3,5	0,4 à 2,5

Les valeurs minimales recommandées sont consignées dans le graphique ci-dessous. Attention les échelles sont logarithmiques. Les différentes courbes font apparaître les épaisseurs minimales en fonction de la plus grande dimension de la pièce pour les procédés de moulage courants.

Le tableau ci-contre reprend les dimensions principales et permet de comparer les différents procédés. On constate que le moulage sous pression est celui qui permet de faire les parois les plus fines mais tout comme le moulage en coquille par gravité, il est limité aux alliages à bas point de fusion.

- La dimension maximale est fonction de :
 - la masse minimale de métal coulé tout en assurant des conditions optimales de résistance mécanique de la pièce.
 - Du tracé permettant d'économiser de la matière.
 - Des moyens de fusion du métal.
 - Des dimensions des moules.

Dans ces épaisseurs maximales, il faut incorporer les dépuilles, les surépaisseurs d'usinage, le positionnement du plan de joint.



2.4 Tracé des parois



La règle principale à respecter est **qu'on ne doit pas avoir de variation brusque d'épaisseur**. 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 tels qu'indiqué ci-contre.

On préférera joindre les deux surfaces avec une pente douce. La pente recommandée est de 10° (ou 15%). Si la plus petite épaisseur est centrée, on effectuera une pente de 5° (ou 7.5%) de chaque côté pour conserver 10° au global.

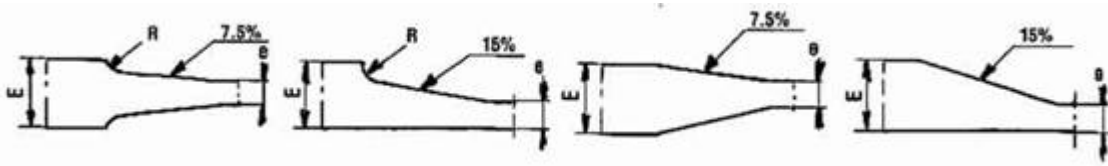
Deux cas peuvent alors se présenter :



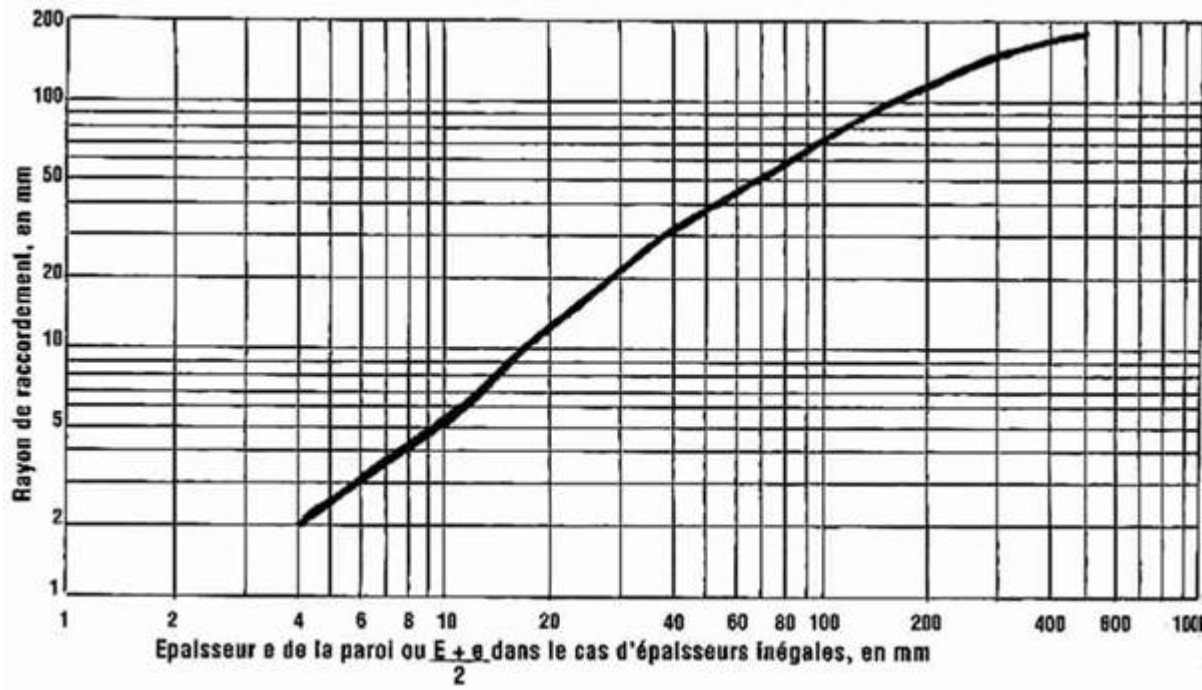
Soit on a une distance suffisante pour joindre les deux faces. On créera alors un grand rayon de

raccordement pour éviter les angles vifs.

- Soit la distance est insuffisante pour joindre les deux faces. On commence donc par une pente à 10° et on complète avec un rayon de raccordement. On détermine le rayon à partir de l'épaisseur de la paroi e ou de la moyenne des épaisseurs des deux parois à relier.

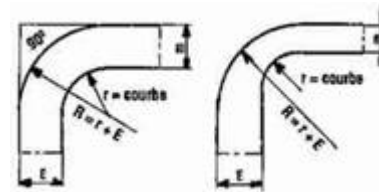


On a déjà dit qu'il faut une dépouille pour faciliter le démoulage. Dans le même ordre d'idées, des parois légèrement inclinées permettront de faciliter ce démoulage tout en conservant une épaisseur de parois constante.



2.5 Tracé d'un raccordement d'angle

- Forme en L :



Il faut garder une épaisseur constante dans les bouts de la pièce qui sont de plus les parties les plus difficiles à mouler. Il faut toutefois respecter la règle précédente sur les rayons de raccordement.

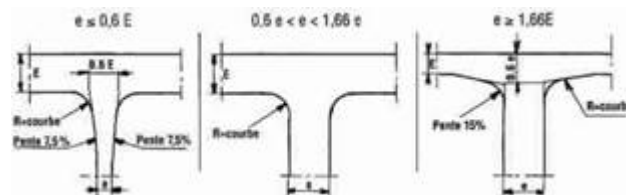
Donc on choisit l'angle intérieur r en fonction du graphique précédent. L'angle extérieur R devient alors : $R = e + r$ pour garder une épaisseur constante.

Si les deux parois ne sont pas de la même épaisseur, on ajoute une condition de tangence sur les deux bords extérieurs. Dans ce cas, les deux rayons de raccordement (intérieur et extérieur) n'ont pas le même centre sinon l'esquisse est surcontrainte.

- Forme en T :

On obtient trois cas classiques :

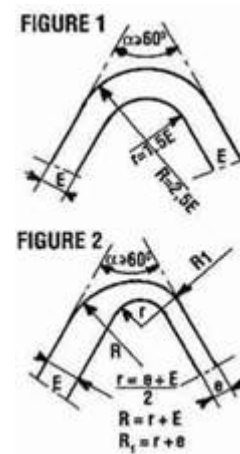
- si $e < 0,6E$ alors on a deux pentes à 7.5% sur la paroi de faible épaisseur jusqu'à ce que celle-ci fasse $0,6E$ d'épaisseur puis on raccorde avec deux rayons dont R est à choisir dans le graphique précédent.
- Si $0,6E < e < 1,67E$ alors on dit que les épaisseurs sont approximativement identiques. On va directement raccorder par deux rayons de valeur R à choisir dans le graphique.



Si $e > 1,67E$ alors la pente à 15% se trouve sur les parois d'épaisseur E jusqu'à une épaisseur de $0,6e$. Le rayon de raccordement r est à choisir dans le graphique.

- Forme en V :

On obtient deux cas classiques :



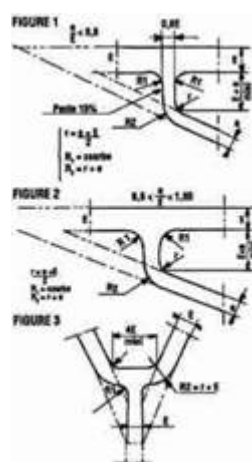
l'épaisseur est constante : le rayon intérieur vaut alors 1,5E et le rayon extérieur vaut 2,5E. On a alors bien une épaisseur E dans l'angle.

- Les parois sont d'épaisseurs différentes : le rayon intérieur vaut $r = (e+E)/2$; le rayon extérieur est constitué de deux cercles tangents : le premier centré sur r vaut $R1 = r+e$; le second vaut $R = r+E$.

- Forme en Y :

On modifie la géométrie pour éviter l'accumulation d'une masse importante de métal. Il existe deux tracés principaux et une variante :

- Si $e/E < 0,6$: on crée une paroi de longueur e+E minimum à angle droit avec la paroi la plus épaisse et de pente 7,5% de chaque côté. On choisit le rayon de raccordement R1 dans le graphique. Le rayon $r = (e+E)/2$ et $R = r+e$.
- Si $0,6 < e/E < 1,67$: idem à la solution précédente mais la paroi supplémentaire est d'épaisseur e.
- variante : les deux branches du Y sont ouvertes. On choisit toujours R, R1 et r comme précédemment.



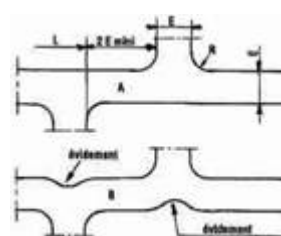
Tracé en X :

L'accumulation de matière à l'intersection est néfaste. Il faut donc à tout prix éviter cette conception. On préférera :

- solution 1 : on réalise deux profils en Y séparés par une distance de 4E minimum.
- Solution 2 : on réalise un trou au centre. Il faut pour cela que l'épaisseur de la pièce soit compatible (voir §2.7).



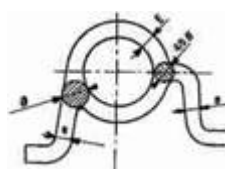
Modification 1 : Ondulation :



Le tracé A est acceptable à la condition que la distance entre deux parois soit de 2E minimum.

Pour peaufiner et atténuer l'effet de masse, on peut créer de légères ondulations au droit des raccordements. Bien sur il faut que ces ondulations restent compatibles avec le sens de démoulage.

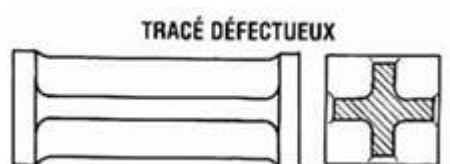
- Modification 2 : Raccordement :



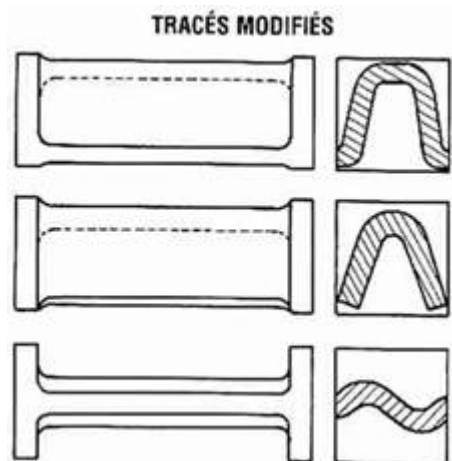
En règle générale, lorsque deux surfaces se rencontrent, on a une concentration de matière minimale si les deux surfaces sont orthogonales. On s'arrangera donc pour modifier la géométrie de la paroi ou de la nervure avant la jonction pour respecter cette condition.

2.6 Tracé des nervures

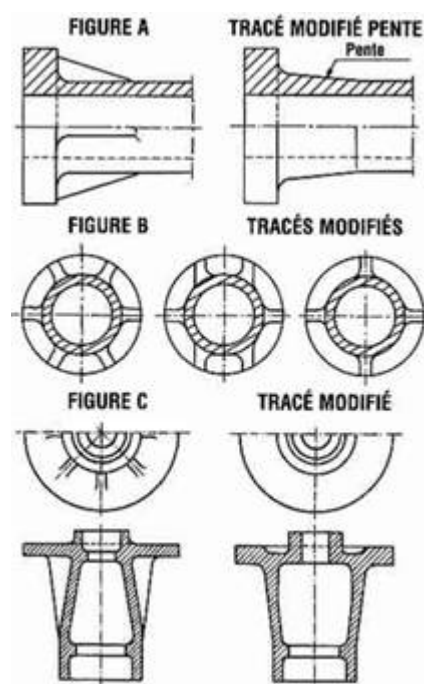
- Renfort de parois // :



La contrainte principale lorsque l'on relie deux parois est qu'elles restent parallèles. Or si on crée une accumulation de matière, on crée des contraintes mécaniques au refroidissement et donc une déformation de la pièce. On peut remédier de manière simple à ce problème en modifiant le tracé des nervures qui relient les deux parois. On adoptera alors un profil ondulant, en V ou en U.



- Nervures rayonnantes :

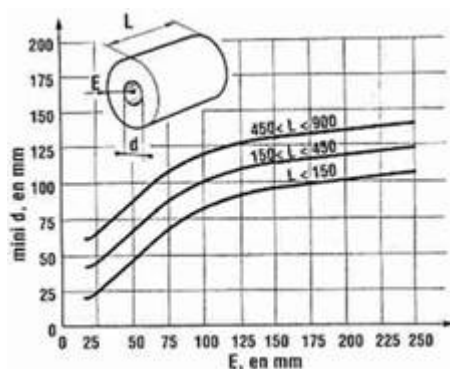


La présence de nervures provoquent des soucis dans le démoulage. Pour pallier à ce problème, on cherchera donc à éliminer les formes en contre-dépouille. De plus on peut étudier la possibilité d'augmenter l'épaisseur générale de la pièce pour pouvoir se passer des nervures pour la résistance mécanique.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

- Figure A : on remplace les nervures non démoulables par une forme tronconique.
- Figure B : on remplace les 6 nervures par 4 nervures plus faciles à démouler ou 6 nervures orientées différemment. Dans ce cas, on ne respecte plus la règle de l'orthogonalité des surfaces en contact.

2.7 Dimension des trous et alésages

- 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. Ils doivent donc avoir des dimensions minimales.

L'avantage des noyaux en sable est qu'ils sont détruits lors du décochage. On aura donc pas besoin de respecter un angle de dépouille pour ces pièces.

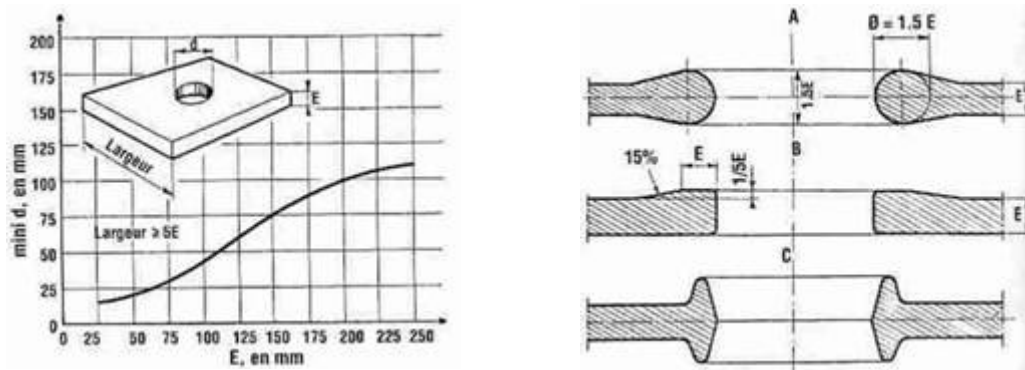
Le tableau ci-contre permet de connaître le diamètre minimal réalisable en fonction de l'épaisseur de matière et de la profondeur de l'alésage. Bien sur compte tenu de la précision obtenue, il faudra usiner l'alésage. Il faut donc en tenir compte pour le diamètre de l'alésage de la pièce brute de fonderie.

- Trous des parois :

Le graphique ci-contre donne le diamètre minimal réalisable par fonderie dans une paroi dont la longueur est au moins 5 fois l'épaisseur.

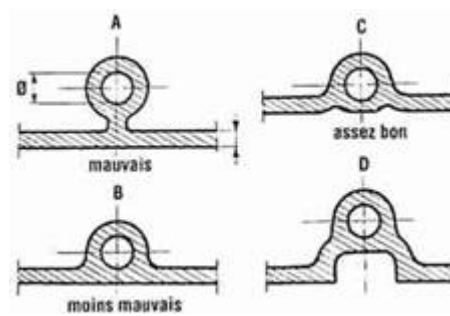
- Trous dans les parois fortement sollicités :

Dans le cas où les plaques trouées sont fortement sollicitées, les contraintes s'accroissent aux points de faiblesse et notamment les perçages. On modifie donc la géométrie de la pièce près de ces zones de faiblesse pour les renforcer. Le tracé C tel qu'indiqué n'est pas recommandé car il faut augmenter trop rapidement la section de la pièce et crée des contraintes dans un endroit déjà fragilisé.



2.8 Tracé des bossages

- Forme des bossages :



Les bossages sont la plupart du temps créés pour permettre le montage d'une vis. 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.

Dans les figures présentées, on constate que :

- A : mauvais tracé.
- B : tracé moins mauvais quoiqu'il existe encore des zones problématiques.
- C, D : tracé qui permet un refroidissement homogène, sans apparition de contrainte.

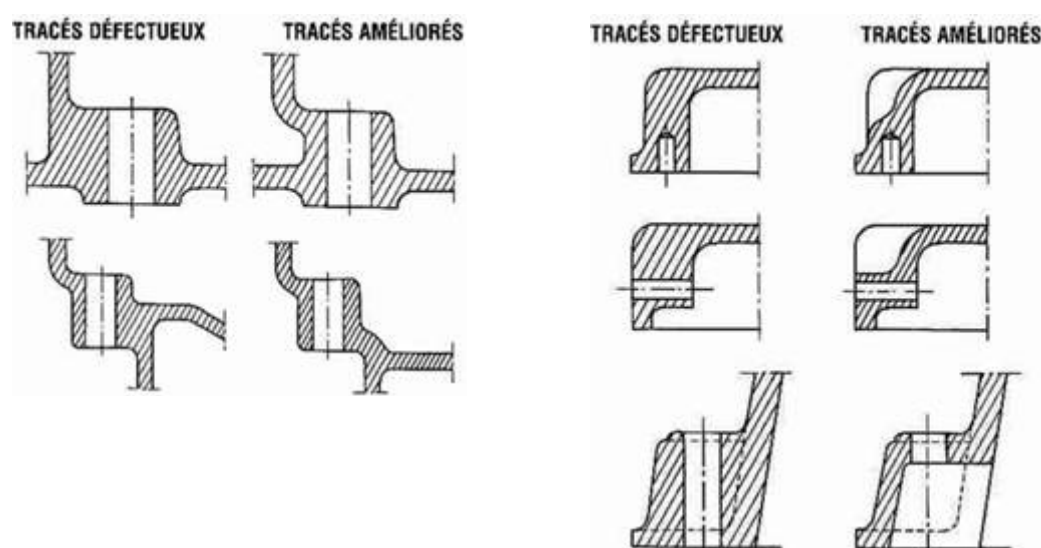
- Tracé des bossages :

La plupart du temps, on peut réduire la matière autour du bossage. De même on ne fera pas de bossage qui dépassent du haut de la pièce : ces conceptions étaient utiles pour réaliser un surfaçage pour positionner les vis; avec les machines modernes il est très facile de réaliser un lamage par alésage.

- Diminution de masse :

On élimine de manière systématique la matière superflue. De même on limite la profondeur des alésages au strict nécessaire.

2.9



Etat de surface

L'état de surface est fonction du procédé employé :

- moulage au sable : $Ra = 12,5$ à $6,3$
- Moulage métallique : $Ra = 6,3$ à $3,2$
- Moulage sous pression : $Ra = 3,2$ à $1,6$
- Moulage à la cire perdue : $Ra = 1,6$ à $0,8$

2.10 Retrait

Le retrait c'est 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 (qui n'a jamais fait éclater une bouteille d'eau dans un congélateur). La matière refroidie sur les parois puis vers l'intérieur. On a donc un phénomène de décollement des parois généralisé.

Le retrait est fonction du matériau mis en oeuvre.

A partir des données du tableau ci-dessous, on peut calculer les dimensions de l'empreinte (bois, métallique, cire) qui doit être réalisée pour obtenir les dimensions désirées de la pièce.

2.11 Déformations dues au retrait

Quelque soit le procédé utilisé, le retrait peut provoquer une déformation ou une rupture des pièces.

Règles à respecter :

- on préférera un nombre de bras impair; les retraits ne s'ajoutent pas puisque les bras ne sont pas face à face (identique au phénomène de nervure pour les plastiques)
- on implante de bras courbes plutôt que droits; le retrait sur le diamètre est mieux contrôlé, la jante n'est pas ovalisée.

2.12 Défaut de positionnement des surfaces

La norme NFA 00-510 définit un système de tolérances et de surépaisseurs d'usinage pour les dimensions des pièces moulées quelque soit le procédé de moulage utilisé.

On définit les cotes nominales de la pièce brute qui incluent les cotes pièce usinée et les surépaisseurs d'usinage.

Compte tenu du procédé utilisé, on détermine la classe de tolérance dimensionnelle que je suis en droit d'attendre de ma pièce moulée. Ensuite en me référant à la cote nominale de ma pièce, j'en déduis les valeurs en millimètres de mon intervalle de tolérance. Je vérifie alors que ma cote mini est bien supérieure à la valeur de la cote finie avec les surépaisseurs d'usinage.

Je fais ensuite apparaître les dépouilles pour savoir si elles doivent être ajoutées, retirées ou réparties autour de ma cote nominale.

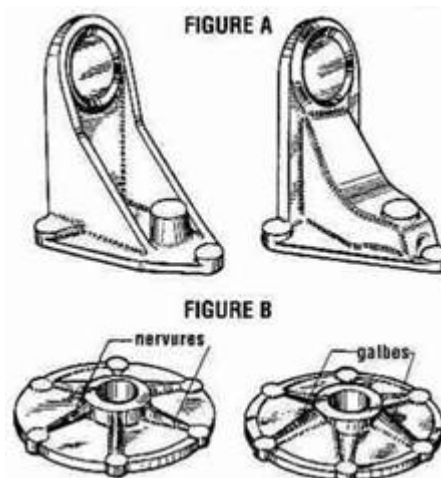
Il faut noter que la classe de tolérance de l'épaisseur des parois est plus élevée de 1 par rapport aux dimensions de ma pièce.

2.13 Surépaisseurs d'usinage

Les surépaisseurs d'usinage sont prévues pour supprimer l'effet du moulage sur les surface fonctionnelles afin d'obtenir la précision dimensionnelle demandée. On la note MA sur les dessins de pièce brute.

Compte tenu du procédé utilisé, on détermine la classe de tolérance de la surépaisseur d'usinage. On se réfère ensuite à l'autre tableau pour déterminer la correspondance entre la classe et la valeur en millimètres.

2.14 Modifications pour amélioration de résistance



Pour les équerres de grande dimension, on peut remplacer les nervures par un caisson. La résistance mécanique est quasiment identique mais la pièce est plus facile à réaliser. Attention : pour respecter la règle des épaisseurs constantes, il faut que le caisson soit creux. Pour cela on va ouvrir la face du dessous.

- On peut remplacer les nervures de section rectangulaire par des nervures de formes galbées (demi-ovale). L'écoulement du matériau est bien meilleur et la variation d'épaisseur bien moins brusque.

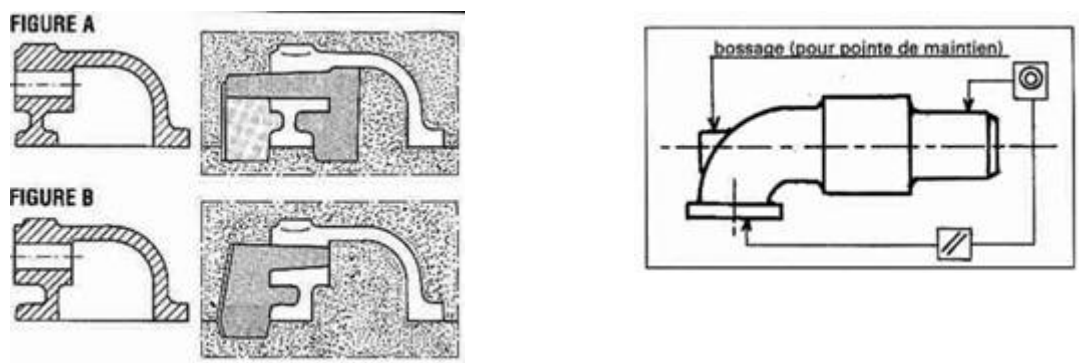
2.15 Modifications pour simplification du moulage

Pour simplifier le moulage, on peut diminuer le nombre de noyaux à implanter. Pour cela, on va éliminer les formes intérieures en contre-dépouille. Il n'y a alors plus qu'un seul noyau qui réalise le trou et l'évidement situé en dessous.

2.16 Modifications pour faciliter l'usinage

La règle de base veut qu'il faut pouvoir positionner la pièce et accéder aux surfaces à usiner pour chacune des phases d'usinage. On peut alors être amené à modifier la géométrie de la pièce, en général en implantant des volumes supplémentaires, pour réaliser les posages. Le travail du concepteur est aussi d'intégrer ces surfaces à sa conception.

Ici par exemple, on va ajouter un bossage en bout de pièce pour faciliter la prise entre pointe. On pourra alors réaliser les usinages sur un tour 3 axes.



3 Moulage avec moule permanent

3.1 Généralités

La mise en oeuvre de chacun des procédés de moulage en moule permanent nécessite la fabrication, par usinage, de l'outillage mécanique nécessaire (moule, noyaux et broches, systèmes de remplissage, d'alimentation et d'éjection).

Un outillage assure la production de plusieurs milliers à plusieurs millions de pièces, selon les procédés.

Des outillages complémentaires sont à concevoir pour optimiser le processus par mécanisation ou automatisation.

Les différents procédés sont : moulage en coquille par gravité, moulage sous haute pression, moulage en basse pression, moulage en contre pression, moulage par centrifugation.

Les pièces réalisées sont toujours en alliages à bas point de fusion : aluminium, cuivre, magnésium, ...

3.2 Moulage en coquille par gravité

3.2.1 Généralités

Les opérations fondamentales : moulage (obtention des formes), remplissage en alliage liquide, alimentation de la pièce pendant la solidification, démoulage, sont assurées par le moule (appelé aussi coquille) qui devra être presque entièrement mécanisé. La répétition de ces opérations amène à parler de cycle de moulage, de cadence de production, qui sont spécifiques à chaque moule.

Le remplissage et l'alimentation sont déterminés par la pesanteur, d'où la désignation courante de ce procédé de moulage : moulage en coquille par gravité.

La précision dimensionnelle permet d'obtenir des pièces avec des tolérances de $\pm 0,1$ à $\pm 0,8$ mm suivant leurs dimensions.

Le prix de revient des outillages étant assez élevé, il faut déterminer le seuil de production où l'utilisation de ce procédé devient rentable (en général pour une série de plus de 2 000 pièces).

3.2.2 Conception d'une coquille

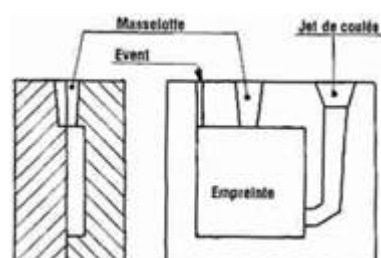
3.2.2.1 Matériaux utilisés pour les moules

La coquille est un moule entièrement métallique. Toutefois, l'emploi de noyaux en sable n'est pas exclu, bien qu'il faille tendre vers un dessin de pièce n'obligeant pas le fondeur à prévoir de tels noyaux. Les alliages métalliques utilisés pour la construction des coquilles diffèrent selon les éléments du moule, étant donné les sollicitations mécaniques et thermiques que subissent ceux-ci sont différentes.

D'une manière générale, ces matériaux doivent garder leurs caractéristiques mécaniques à haute température (500 à 550°C pour certains éléments), être mis en forme sans entrainer un prix de revient prohibitif de la coquille.

Alliage coulé	Éléments de moule	Matériaux	État	Observations
Alliages d'aluminium	semelle et chapes	fonte grise lamellaire perlitique	stabilisé	moulé et usiné
	noyaux et broches	acier 35 NC 15 et Z 35 CD SV 05	trempe et revenu	broches très sollicitées
Alliages de cuivre	semelles et chapes et parties rapportées	fonte grise lamellaire perlitique 25 CD 4	stabilisé, trempé et revenu	parties moulées rapportées dans chapes en fonte
	noyaux et broches	Z 30 WC 09-03 et Z 10 CNS 25-20	trempe et revenu	
Fonte	tous éléments	fonte	stabilisé	fonte de même nuance que celle coulée
Pour tous alliages	éjecteurs, poussoirs, doigts de démoulage	Z 35 CDSV 05	trempe et nitruré	
	goujons et bagues de centrage	16 NC 6 ou Z 35 CDSV 05	cémenté nitruré	
	pignons et crémaillères	30 NC 11	trempe et revenu	

3.2.2.2 Le moule



Usiné dans des blocs, il est divisé en autant d'éléments qu'il est nécessaire pour l'extraction des pièces, des trous de coulée, des masselottes.

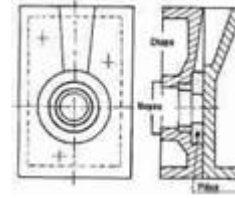
Un morcellement trop important des moules présente des problèmes de mise en position et de maintien en position des éléments pendant la coulée.

3.2.2.3 Positionnement de la pièce dans le moule

La pièce est généralement placée verticalement dans le moule pour faciliter le remplissage de l'empreinte sous l'action de la hauteur de charge.

Du choix de positionnement va dépendre :

-



l'alimentation de la pièce

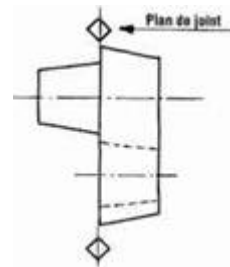
- le démoulage
- l'ébavurage
- la détermination du plan de joint
- le nombre d'éléments du moule

3.2.2.4 Détermination du plan de joint

Le plan de joint du moule est choisit en fonction des formes de la pièce.

Il doit tenir compte :

-



du remplissage de l'empreinte (jet de coulée)

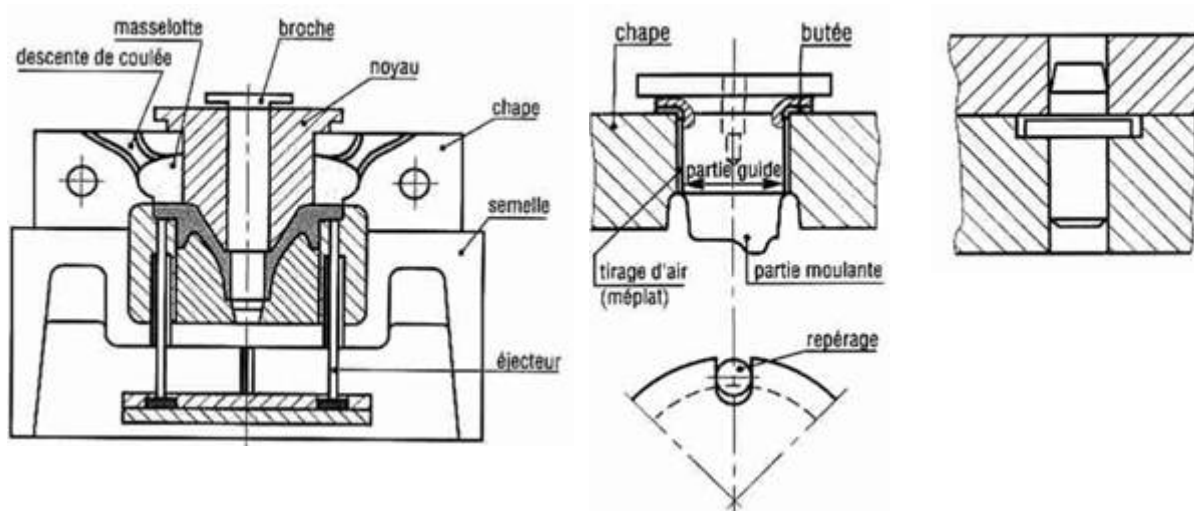
- des masselottes
- du démoulage de la pièce
- de l'usinage des chapes
- des contre dépouilles (à éviter)

Dans tous les cas, on privilégiera un plan de joint PLAN.

3.2.2.5 Éléments constitutifs d'un moule

Les quatre fonctions (moulage, remplissage, alimentation, éjection) sont assurées par les éléments suivants :

- moulage
 - chapes : bloc usinés qui constituent la partie principale de l'empreinte en donnant les formes extérieures de la pièce. Les chapes sont mobiles : leur positionnement relatif est assuré par des goujons. Le guidage par rapport à la semelle est une liaison glissière prismatique réalisée par des lardons. Il faut prévoir du jeu à la construction des guidages pour éviter le blocage dû à la dilatation thermique des chapes.
 - Semelle : comporte une partie moulante rapportée. Elle assure le support, le guidage et le centrage des chapes.
 - Noyaux : ils sont généralement métalliques et mobiles; il faut prévoir leur guidage et centrage, assurés par le coprs cylindrique ou conique ou par rainure en T. Guidage assez long pour que le noyau reste en prise dans sa portée lors du démoulage (cette partie guide doit être plus grande que la paryie moulante pour compenser la différence de dilatation), leur butée, constituée par un double épaulement et leur repérage, si nécessaire, par ergot, lardon, méplat. Ces noyaux sont montés dans un joint, dans une chape ou dans la semelle; la direction de démoulage est horizontale, verticale ou oblique; lorsque la forme intérieure est en contre dépouille et que l'emploi de noyau métallique est recommandé (homogénéité du moule impérative), on juxtapose plusieurs parties de noyaux qui seront démoulées à la suite.
 - Broches : noyaux de faible section et de grande longueur cylindrique; elles assurent la venue des alésages; les conditions de montage sont identiques aux noyaux sauf pour les broches très longues qui sont centrées à leur deux extrémités.



- Remplissage

Cette opération consiste à amener l'alliage liquide dans l'empreinte. Le système de coulée doit être aussi simple et direct que possible pour limiter les échanges thermiques avec le moule. Il se compose :

- une descente de coulée
- un canal
- une ou plusieurs attaques
- alimentation

On entend par alimentation un apport de métal liquide à la pièce pendant sa solidification. Il est nécessaire de diriger cette solidification qui progresse des parties minces vers les parties plus massives et de régler l'évacuation de la chaleur hors du moule. Les masselottes sont taillées dans les chapes moulantes ou dans des chapes spéciales : les chapes à jets.

L'épaisseur du moule est variable suivant les parties de la pièce. De 20 mm pour les parties fines jusqu'à 60 mm pour les parties très épaisses.

Des refroidisseurs en métal bon conducteur de chaleur (cuivre) peuvent être montés localement. Les noyaux très échauffés sont refroidis par de l'air comprimé et parfois de l'eau circulant dans des canaux.

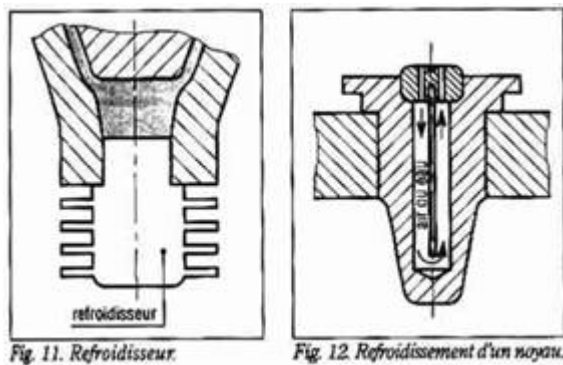


Fig. 11. Refroidisseur.

Fig. 12. Refroidissement d'un noyau.

- Éjection

C'est l'opération qui consiste à extraire la pièce solidifiée et à température élevée (plusieurs centaines de °C) de la coquille ouverte.

Pour faciliter ce démoulage, trois facteurs interviennent : la dépouille, le poteyage et une action mécanique.

Le poteyage est un enduit dont le rôle est triple :

- faciliter l'éjection de la pièce
- protéger l'empreinte de la corrosion
- régler le refroidissement de l'alliage

Il existe deux types principaux :

- poteyage blanc : favorise le refroidissement lent; utilisé sur les canaux de coulée, les masselottes.
- Poteyage noir : favorise le refroidissement rapide; utilisé sur les noyaux et broches notamment. Son usure rapide nécessite un renouvellement périodique.

L'action mécanique s'exerce par des éjecteurs répartis sur la pièce et qui la pousse hors du moule. Il faut que la pièce soit retenue par la partie de moule comportant le système d'éjection : pour cela on fait varier la valeur des dépouilles suivant les faces de la pièce. Le système est composé :

-

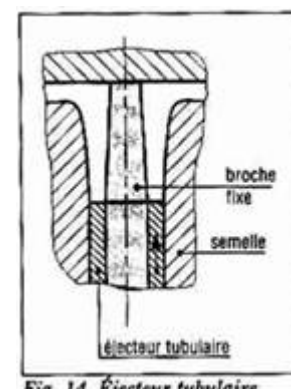


Fig. 14. Éjecteur tubulaire.

- d'éjecteurs cylindriques pleins de diamètre 10mm environ ou d'éjecteurs tubulaires autour d'une broche.
- d'une double plaque d'éjection guidée sur des broches et mise en mouvement rectiligne par une crémaillère ou un vérin hydraulique.

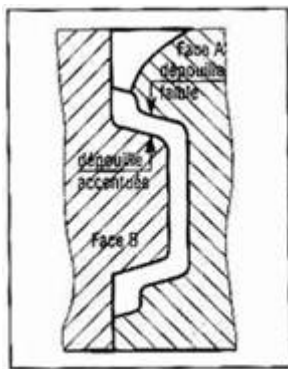


Fig. 13. Dépouilles différenciées.

3.2.2.6

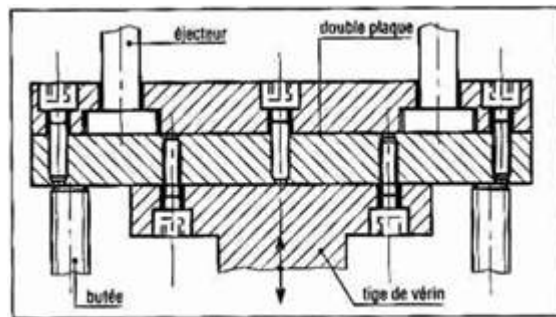
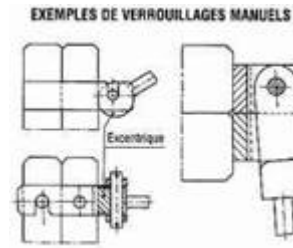


Fig. 15. Système d'injection.



Verrouillage des moules

Pendant la coulée du métal en fusion, il est nécessaire de maintenir les chapes en position pour éviter leur déplacement sous l'action de la poussée du métal. Les mécanismes utilisés sont actionnés mécaniquement ou manuellement.

Mécanismes : crampes, étriers à came ou excentrique, pignons-crémaillères, vérins pneumatiques.

3.2.3 Conception du système d'alimentation et des masselottes

3.2.3.1 Systèmes d'alimentation

3.2.3.1.1 Coulée par le haut (coulée en chute)

Elle s'adresse en priorité aux pièces de faibles hauteurs.

Avantages :

- elle favorise une solidification correcte du métal. La pièce après l'arrêt de la coulée, continue à être approvisionnée par le métal par sa descente par gravité.
- Les masselottes sont de petites dimensions.

Inconvénients :

- le métal tend à s'oxyder pendant la coulée
- l'évacuation de l'air n'est pas optimale
- turbulences du métal

Remèdes :

- basculer progressivement le moule pendant la coulée.
- Déporter le canal de coulée.

3.2.3.1.2 Coulée sur le côté (coulée latérale)

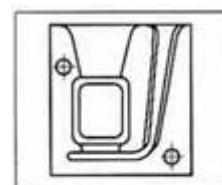


Fig. 6. Coulée en source.

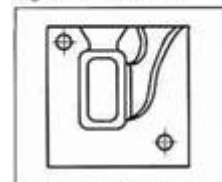


Fig. 7. Coulée latérale.

Elle s'adresse aux pièces de hauteur moyenne ou importante.

Le remplissage de l'empreinte est assez calme, peu de turbulences, et l'alimentation suffisante.

Des masselottes et des tirages d'air sont prévus à la construction du moule.

3.2.3.1.3 Coulée par le bas (coulée source)

Elle s'adresse de préférence aux pièces moulées avec des noyaux en sable.

Le remplissage de l'empreinte se fait progressivement, sans turbulences.

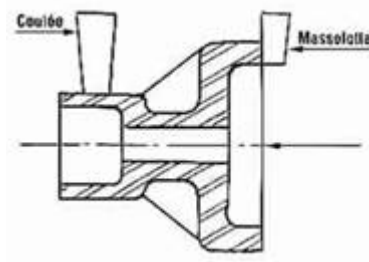
La remontée du métal dans l'empreinte facilite l'évacuation de l'air.

Le métal, au cours de sa remontée dans l'empreinte, refroidit; cela nécessite une température de coulée plus élevée.

3.2.3.2 Masselottes

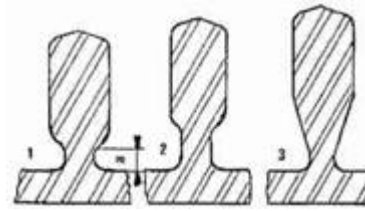
3.2.3.2.1 Rôle

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; elles sont placées près des parties massives de la pièce.

3.2.3.2.2 Raccordement des masselottes

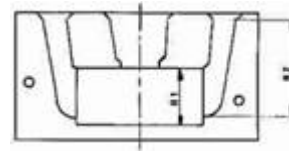


Le raccordement des masselottes avec le volume de la pièce doit permettre un bon approvisionnement en métal liquide.

Une attaque de masselotte trop étroite ou trop longue se refroidit trop rapidement, elle ne remplit plus son office efficacement.

Le tracé 1 est le plus favorable.

3.2.3.2.3



hauteur des masselottes

L'empreinte sera convenablement remplie si la masselotte a une hauteur supérieure à celle de la pièce. $H_2 > H_1$

3.2.3.3 Tirages d'air

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 10 mm de largeur et de 0,3 mm de profondeur sont usinés. Sur les noyaux, des rainures ou des méplats sont usinés. On peut aussi multiplier volontairement le nombre de noyaux pour multiplier les joints.

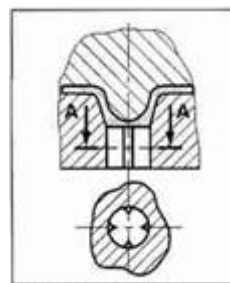


Fig. 10. Goupille d'air.

On monte des goupilles d'air pour traverser les parois.

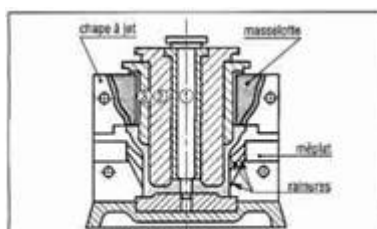


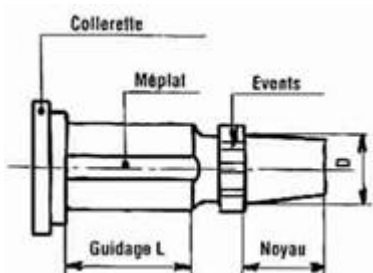
Fig. 9. Multiplication des éléments de noyau : tirages d'air aux joints.

3.2.3.4 Réalisation des noyaux et des broches

3.2.3.4.1 Utilisation

Les noyaux et les broches sont utilisés pour réaliser des formes en creux dans les pièces moulées. Ceux-ci sont réalisés en acier ou en sable.

3.2.3.4.2 Noyaux métalliques



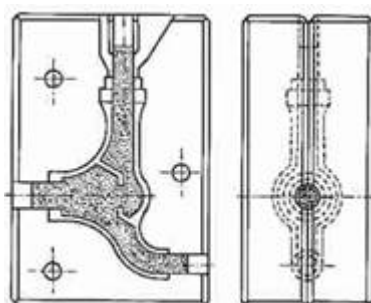
Les noyaux métalliques ont une forme générale tronconique au contact de la pièce moulée.

Le guidage du noyau dans la chape est assuré par une portée cylindrique dont la longueur L ne doit pas être inférieure à $0,8 \cdot D$.

Les noyaux comportent des formes usinées pour réaliser le tirage d'air.

Le métal refroidi se contracte sur le noyau, l'extraction de celui-ci est réalisé par une colerette et un levier.

3.2.3.4.3



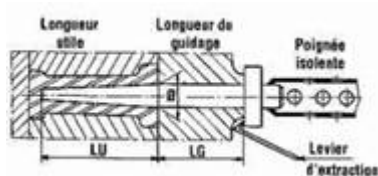
Noyaux en sable

Les formes intérieures des pièces peuvent être réalisées à l'aide d'un noyau en sable.

Le noyau est réalisé dans une boîte à noyau suivant le procédé Croning en boîte chaude ou durci au gaz carbonique (voir §4).

Le noyau est décoché de la pièce après ouverture du moule, par vibrations, le sable tombant en poussière.

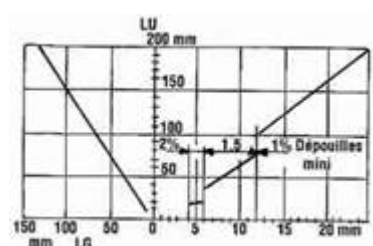
3.2.3.4.4 Broches



Les broches sont des noyaux de faible diamètre qui permettent de réaliser des alésages borgnes ou débouchants.

Les broches comportent une dépouille pour faciliter le démoulage sous l'action d'un levier. Une poignée isolante est placée à l'extrémité de la broche pour faciliter sa manutention.

3.2.3.4.5



Dimensions des broches

L'abaque permet de déterminer la longueur de la broche et la valeur de sa dépouille en fonction de son diamètre.

Pour les alésages de faible diamètres, la dépouille est augmentée, le métal refroidi ayant tendance à se contracter autour de la broche.

3.2.3.4.6 Dimensions des trous borgnes

d = ø (mm)	2		3		4		6		12	
	à	3	à	4	à	6	à	12	à	12
Alliages	Zinc	5d	5d	5d	5d	6 à 8d	6 à 8d	6d	6d	6d
	Légers		4d	4d	4d	5 à 6d	5 à 6d	6d	6d	6d
	Cuivre				3d	3 à 4d	3 à 4d	4d	4d	4d

Longueur Lu maxi en fonction de l'alliage

Les trous borgnes réalisés dans une pièce à l'aide de noyaux ou de broches ont une longueur Lu maximale à ne pas dépasser (fonction du diamètre).

L'action du métal au moment de la coulée peut entraîner une flexion des noyaux ou des broches, la déformation ne permettant pas leur extraction après refroidissement.

3.2.3.5 Détermination du dispositif de coulée

3.2.3.5.1 Module de refroidissement

· Notion de module de refroidissement

Les renseignements suivants concernent les alliages légers.

Plus la pièce à mouler est massive, plus le temps de refroidissement de celle ci est long.

Ce qui détermine son temps de solidification, c'est le rapport de son volume V à toutes les surfaces S en contact avec les parois refroidissantes du moule.

D'où : Module de refroidissement = $V / S = MG$

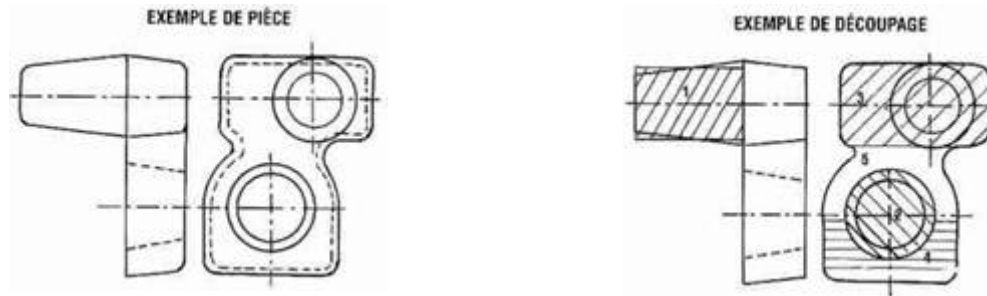
avec V : volume d'une partie de la pièce (en cm³)

S : surface de refroidissement (en cm²)

· Détermination du module de refroidissement

Plus le module de refroidissement est grand, plus la partie de la pièce considérée refroidie lentement. Pour réaliser ce calcul, il faut découper la pièce en volumes simples et rechercher pour chacun d'eux le module de refroidissement.

Le découpage réalisé fait apparaître les cylindres 1 et 2, les parallélépipèdes 3 et 4, le demi-cylindre 5, ...



· Calculs des coefficients MG

	Volume cm ³	Surface cm ²	MG		Volume cm ³	Surface cm ²	MG
1	$\pi \times 1,35^2 \times 4,2$ $V_1 = 24,04$	$\pi \times 2,7 \times 4,2 + \pi \times 1,35^2 =$ $S_1 = 41,35$	$MG_1 = \frac{V_1}{S_1}$ $MG_1 = 0,58$	4	$3,4 \times 5 + 2,2 - \frac{V_2}{2}$ $V_4 = 28,55$	$2 \times 2,2 \times 3,4 - (2,2 \times 5) + (\pi \times 1,6 \times 2,2) - (\pi \times 1,6^2) =$ $S_4 = 62,97$	$MG_4 = \frac{V_4}{S_4}$ $MG_4 = 0,45$
3	$2,5 \times 5,8 \times 2,2$ $V_3 = 31,9$	$2,2 (2 + 0,4 + 5,7 + 5) + 2 (5,8 \times 2,5) - \pi \times 1,6^2 =$ $S_3 = 51,41$	$MG_3 = \frac{V_3}{S_3}$ $MG_3 = 0,62$	5	$\frac{\pi}{4} (2,5^2 - 1,6^2) \times 2,2 =$ $V_5 = 12,75$	$\pi (2,5^2 - 1,6^2) + (\frac{2}{3} \pi \times 2,5 \times 2,2) + (\pi \times 1,6 \times 2,2) - \pi \times 1,6^2 =$ $S_5 = 34,17$	$MG_5 = \frac{V_5}{S_5}$ $MG_5 = 0,37$

· Résultats

On peut calculer le volume total de la pièce V=97,24 cm³

On détermine aussi l'ordre de solidification des formes de base :

1er	2ème	3ème	4ème
MG5	MG4	MG1	MG3
0,37	0,45	0,58	0,62

· Conclusion :

La zone qui a le plus grand module de refroidissement est solidifiée en dernier. Dans notre exemple, il s'agit de la zone 3.

On placera donc la masselotte sur la zone 3

Inversement, on placera le trou de coulée sur la zone 5 qui a le plus faible module de refroidissement

3.2.3.5.2 Dimensionnement de la masselotte

3.2.3.5.3 Calcul du système de coulée

<p>DESCENTES DE COULÉE</p>	<p>Les dimensions des descentes de coulée sont fonction :</p> <ul style="list-style-type: none"> - du volume de la pièce et de la masselotte. - du mode de coulée. - de la nature de l'alliage - (Fluidité de celui-ci). - de la hauteur nécessaire de la descente de coulée. - de la plus petite épaisseur de la paroi « e ». - du coefficient de perte de charge. - de la masse de la pièce 	
<p>COEFFICIENTS DE PERTES DE CHARGES</p>	<p>Le métal pendant sa descente est ralenti par la forme du système de coulée. Les sections rétrécies entraînent des pertes de charges</p>	<p>Les pertes de charges sont évaluées à :</p> <ul style="list-style-type: none"> - coulée par le haut : 0,7 - coulée par le côté : 0,4 - coulée par le bas : 0,4 - coulée de pièces plates : 0,25
<p>VOLUME DE L'EMPREINTE</p>	<p>Le volume de métal coulé doit remplir toutes les formes prévues dans le moule. Unités : cm³. Il faut tenir compte également du retrait volumique lié au refroidissement du métal.</p>	<p>Volume V = Volume de la gravure + Volume de la masselotte + Volume du retrait de refroidissement de la gravure et de la masselotte.</p>
<p>TEMPS DE REMPLISSAGE</p>	<p>Le temps de remplissage est déterminé en secondes. Il est déterminé à partir d'un abaque en fonction de la masse brute de la pièce et de l'épaisseur minimale d'une partie de la pièce. Pour la pièce étudiée, son épaisseur minimale est de 8 mm, sa masse de 0,6 kg. La lecture de l'abaque donne un temps de coulée de 6 secondes.</p>	

CALCUL D'UN SYSTEME DE COULEE

Calcul de la plus petite section transversale :

• Section théorique S'd en chute par le haut :

$$S'd = \frac{V}{0,7 t (\sqrt{2 g h_1})}$$

• Section théorique S'd en côté ou en bas :

$$S'd = \frac{V}{0,4 t \sqrt{g (h_1 + h_2)}}$$

h_1 = hauteur de la descente de coulée

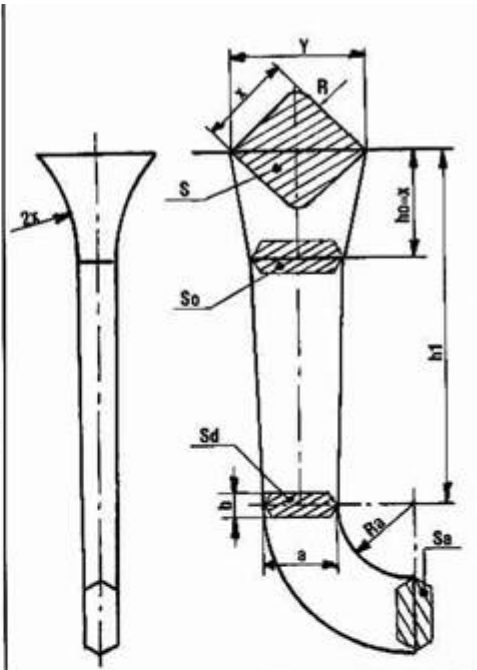
V = Volume total de l'empreinte

t = temps de remplissage en secondes

g = pesanteur (981 cm/s²)

0,7 ou 0,4 = coefficients de pertes de charge

h_1 et h_2 : se reporter au dessin « descentes de coulée » page 46.



CALCUL D'UN SYSTEME DE COULEE

• Section pratique Sd, choisir a et b dans le tableau ci-contre.

Dimensions de la coulée :

$$S = 2 Sd \sqrt{h_1} \quad a = \sqrt{3 Sd}$$

$$h_0 = x = \sqrt{S} \quad Y = \sqrt{2x}$$

$$h = \sqrt{\frac{sd}{3}} \quad b \text{ ne doit pas avoir une valeur inférieure à 2,5 mm.}$$

$$r = \frac{b}{2} \quad S_0 = sd \sqrt{\frac{h_1}{h_0}}$$

$$S_a = 2 \text{ à } 4 Sd \quad R = \frac{x}{4} = a$$

Si $S'd > 3 \text{ cm}^2$ prévoir plusieurs « trous de coulée ».

S'd (cm ²)	a (mm)	b (mm)	Sd/S'd
0,3	12	4	1,6
0,5	15	5	1,5
0,8	18	6,6	1,35
1,1	21	7	1,35
1,5	24	8,8	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

3.2.3.5.4 Application : Pièce CPEF du CERTA

Nous allons ici mettre en application les calculs précédents pour déterminer le système de la pièce Couvercle de Pompe à Eau modèle F. On donne le dessin de définition de la pièce finie, il aurait fallu travailler sur la pièce avec ses surépaisseurs d'usinage.

A partir de ce dessin et conformément à la méthode expliquée ci-dessus, on découpe la pièce en grands ensembles géométriques :

- le perçage diamètre 40 mm et longueur 70 mm : volume 1
- le cylindre central $\Phi_{int} = 40$ mm et $\Phi_{ext} = 56$ mm, longueur 50 mm : volume 2
- $\frac{3}{4}$ cylindre extérieur $\Phi_{int} = 40$ mm et $\Phi_{ext} = 140$ mm, longueur 20 mm : volume 3
- parallélépipède 70 * 125 * 20 : volume 4

On calcule la quantité de matière pour chaque volume :

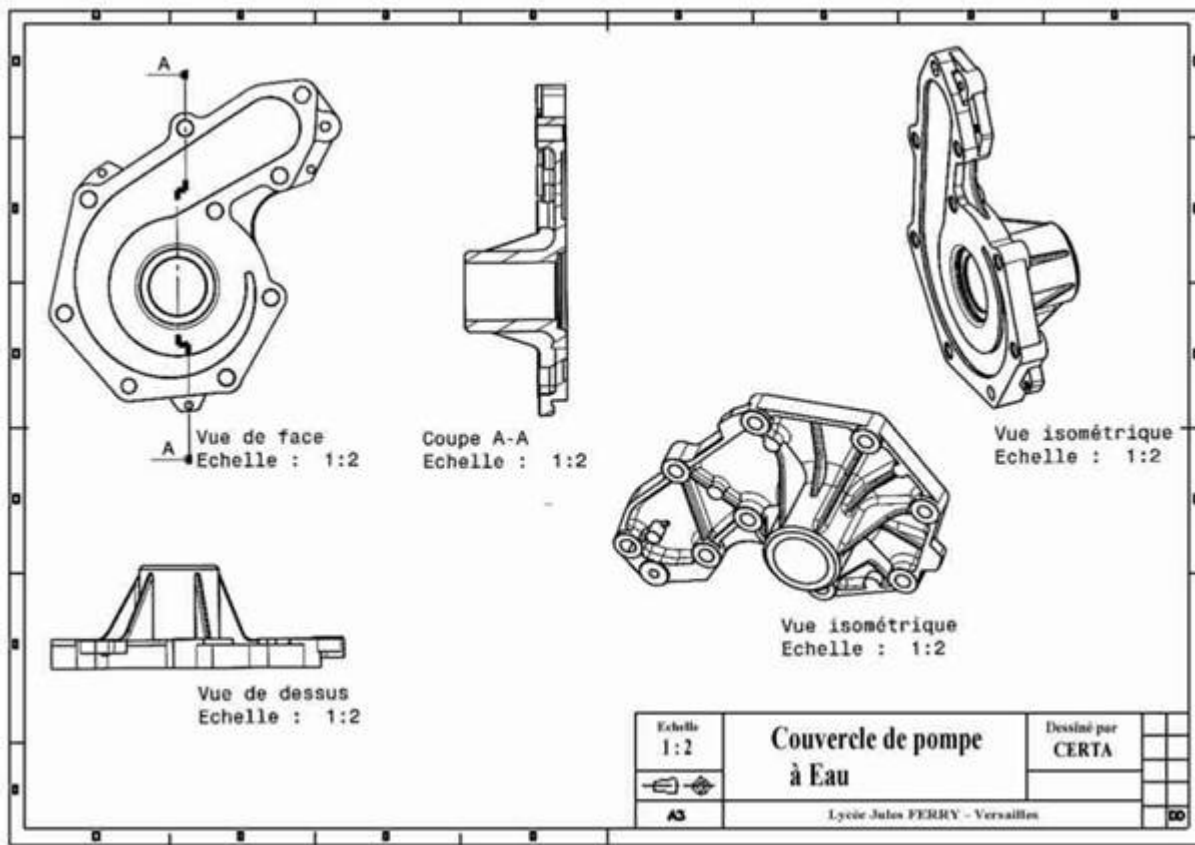
- volume 1 = $\pi \cdot 4^2 \cdot 7/4 = 88 \text{ cm}^3$
- volume 2 = $\pi \cdot (5,6^2 - 4^2) \cdot 5/4 = 60 \text{ cm}^3$
- volume 3 = $\pi \cdot (14^2 - 4^2) \cdot 2/4 = 280 \text{ cm}^3$
- volume 4 = $7 \cdot 12,5 \cdot 2 = 175 \text{ cm}^3$

On calcule la surface en contact avec l'extérieur pour chaque volume :

- surface 1 = sans objet
- surface 2 = $\pi \cdot 5,6 \cdot 5 + \pi \cdot 4 \cdot 5 + \pi \cdot (5,6^2 - 4^2) = 163 \text{ cm}^2$
- surface 3 = $3/4 \cdot \pi \cdot 14 \cdot 2 + \pi \cdot 4 \cdot 2 + \pi \cdot (14^2 - 4^2) + \pi \cdot (14^2 - 5,6^2) = 360 \text{ cm}^2$
- surface 4 = $2 \cdot 7 \cdot 12,5 + 2 \cdot 12,5 \cdot 2 + 2 \cdot 7 \cdot 2 = 250 \text{ cm}^2$

on en déduit le coefficient de refroidissement :

- MG1 = sans objet
- MG2 = $V2/S2 = 0,37$ --> implantation de la coulée
- MG3 = $V3/S3 = 0,78$ --> implantation de la masselotte 1
- MG4 = $V4/S4 = 0,7$ --> implantation de la masselotte 2



Après avoir déterminé les implantations, on calcule les valeurs des masselottes. On a :
coefficient de refroidissement :

$$Mgm1 > 1.3 * MG3 = 1$$

$$Mgm2 > 1.3 * MG4 = 0.9$$

on utilise des masselottes pyramidales. On aura donc :

$$V = \frac{h}{3} * (a^2 + b^2 + a*b)$$

$$S = a^2 + 2*a*h + (a+b)*h$$

on cherche à déterminer les valeurs de a, b et h qui résolvent le système :

$$V_{masselotte} > 0.5 * V_{cylindre}$$

$$Mgm = \frac{V}{S} > 1 \text{ (pour la masselotte 1)}$$

Masselotte 1 :

on pose par exemple **a=6 cm, b=4 cm**. On cherche h qui résolve le système précédent :

$$V1 = 25 * h > 140$$

$$S1 = 36 + 22 * h \text{ avec } Mgm1 = \frac{V1}{S1} = \frac{25h}{(36 + 22 * h)} > 1$$

on obtient $h > 5.6$ et $h > 12$. on pose donc **h=12**

on vérifie que l'on a alors :

$$V1 = 300 \text{ cm}^3 \text{ et } S1 = 300 \text{ cm}^2 \text{ d'où } Mgm1 = 1 \text{ ok}$$

Masselotte 2 :

On pose ici aussi **a=6 cm, b=4 cm**. On cherche h qui résolve le système précédent :

$$V1 = 25 * h > 87.5$$

$$S1 = 36 + 22 * h \text{ avec } Mgm1 = \frac{V1}{S1} = \frac{25h}{(36 + 22 * h)} > 0.9$$

on obtient $h > 3.5$ et $h > 6.2$. on pose donc **h=6.5**

on vérifie que l'on a alors :

$$V1 = 162 \text{ cm}^3 \text{ et } S1 = 179 \text{ cm}^2 \text{ d'où } Mgm1 = 0.9 \text{ ok}$$

Calcul de la masse de la pièce :

$$m = V * \text{densité} = 0.5 \text{ dm}^3 * 2.7 = 1.35 \text{ kg en masse nette soit}$$

$$M = 1.6 * m = 2.1 \text{ kg}$$

avec une épaisseur de parois mini de 3 mm.

On obtient un temps de remplissage de 3.8 secondes.

Calcul du système de coulée :

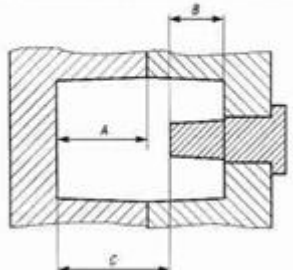
On choisit de couler par le côté (cf formule) selon le schéma ci-dessous :

$$S'd = \frac{V}{(0.4 * t * g * (h1 + h2))} = \frac{975}{(0.4 * 3.8 * 981 * (220 + 65))} = \frac{675}{225} = 3$$

D'après le tableau, on choisit alors les dimensions du trou de coulée : a=33mm et b=11 mm. On aura aussi $S_d=1.2 \cdot S'd=3.6 \text{ cm}^2$. On peut à partir de là déterminer toutes les valeurs utiles pour tracer le trou de coulée.

3.2.4

Type de cote D	Alliage d'aluminium	Alliage de cuivre
A - Cotes dans une même partie de moule	$K_1 = 0,2$ $K_2 = 1,5/1000$	$K_1 = 0,3$ $K_2 = 2/1000$
B - Cotes obtenues par deux éléments de moule	$K_1 = 0,3$ $K_2 = 2/1000$	$K_1 = 0,45$ $K_2 = 3/1000$
C - Cotes obtenues par trois éléments de moule et traversant le plan de joint	$K_1 = 0,4$ $K_2 = 2,5/1000$	$K_1 = 0,6$ $K_2 = 3,5/1000$



Tolérances linéaires en mm : $\Delta L = K_1 + K_2 D$ pour $L < 1000$
 D : cote nominale
 L : plus grande dimension de la pièce.

Tableau 3 et fig. 16. Tolérances linéaires

Pièces obtenues

Les pièces coulées en coquille par gravité sont obtenues avec plus de précision que par la coulée en sable, c'est-à-dire :

3.2.4.1 Précision dimensionnelle

Elle est déterminée en fonction du matériau et de la grande dimension de la pièce. Elle varie selon la position de la cote considérée dans l'empreinte.

On admet que, pour les alliages légers, un intervalle de tolérance minimal de quelques dixièmes de mm (~0,3 pour petites pièces). On peut appliquer la formule : $IT = k_1 + k_2 \cdot l$ avec $k_1 = 0,2$ à $0,4$; $k_2 = 1,5/1000$ à $2,5/1000$; l la cote tolérancée.

3.2.4.2

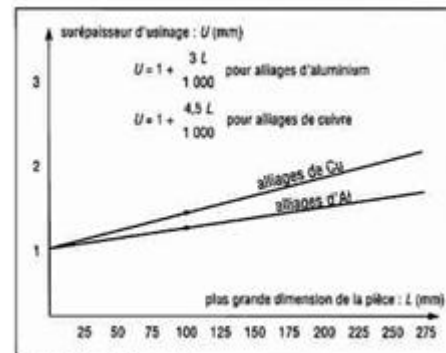


Fig. 17. Surépaisseur d'usinage.

Surépaisseur d'usinage

Elle se définit en fonction de la plus grande dimension de la pièce suivant les matériaux coulés. Pour les alliages légers, elle varie de 1 à 2,5 mm. On applique une formule indiquant cette surépaisseur S en fonction de la plus grande longueur L, soit $S = 1 + 3 \cdot L / 1000$.

3.2.4.3

		Alliages d'Alu.	Alliages de Cu.
Face A	Cote ≤ 50 mm	1° 30' mini	2° mini
	Cote > 50 mm	1° mini	1° 30' mini
Face B	Toutes cotes	2° mini	2° 30' mini

Tableau 4. Dépouilles.

Ø mm du trou	Alliages d'aluminium	Alliages de cuivre
Ø ≤ 6	1° 30' mini	2° mini
6 < Ø ≤ 12	1° mini	1° 30' mini
Ø > 12	0° 30' mini	1° mini

Tableau 5. Dépouilles pour trous.

Dépouille

Elle est faible (1 à 3°) et varie en fonction de la position des formes à obtenir (extérieur ou intérieur de pièce) et de l'extraction de la pièce (la pièce devant s'extraire de l'empreinte dépourvue d'éjecteurs à l'ouverture du moule).

3.2.4.4 Trous

Ø mm	Longueur L mm	
	Alliages d'aluminium	Alliages de cuivre
4 à 6	4 × Ø	3 × Ø
6 à 12	5 × Ø	4 × Ø
> 12	6 × Ø	5 × Ø

Longueur maxi : L des trous bruts de fonderie en fonction du diamètre Ø.

Tableau 2. Rapport longueur/diamètre des trous bruts de fonderie.

Ils s'obtiennent brut de coulée, à partir d'un minimum de 4mm et pour des profondeurs en rapport avec

le diamètre; avec des dépouilles de $0,30^\circ$ à 2° en fonction des diamètres (maxi pour le petits diamètres).

3.3 Moulage en coquille sous haute pression

3.3.1 Généralités

On injecte, par l'intermédiaire d'un piston, en un temps très court (de l'ordre de 0,1s) un alliage en fusion dans un moule métallique.

Une surpression pouvant atteindre une valeur de 100 Mpa est alors appliquée au métal pour compenser le retrait de solidification. Les moules sont composés de deux parties principales fixées sur des machines spéciales qui fonctionnent suivant un cycle réglable (à peu près celui de la coulée par gravité).

Ce procédé est rentable à partir de 10 000 à 20 000 pièces fabriquées et peut être utilisé pour plusieurs millions de pièces.

3.3.2 Machines à mouler sous pression

L'architecture d'une machine est la suivante : un bâti reposant sur le sol. Deux plateaux fixes reliés par quatre colonnes. Un plateau mobile supporté et guidé par les colonnes et le bâti. L'axe des machines est horizontal.

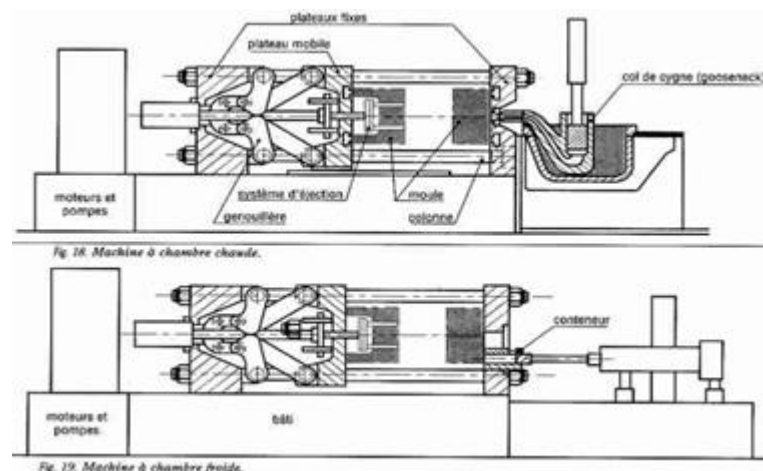
En outre quatre dispositifs assurent les opérations élémentaires du cycle qui est : fermeture du moule, injection, ouverture, éjection.

On trouve donc :

- un dispositif générateur d'énergie composé de moteurs et de pompes qui fournissent l'énergie sous forme de fluides comprimés (air, eau, huile).
- Un dispositif de fermeture et de verrouillage ; le plateau mobile est mis en mouvement par un vérin et une genouillère, constituant une butée positive, empêche le recul du plateau lors de la mise sous pression du métal.
- Un dispositif d'injection qui est placé derrière l'un des plateaux fixe et qui détermine le type de machine. Il existe deux types de systèmes :
 - le premier, constitué d'une chambre appelée gooseneck, est continuellement immergée dans le métal en fusion contenu dans un four placé derrière le plateau de la machine : ce sont les machines à chambre chaude.
 - Le deuxième est constitué d'un cylindre (ou conteneur) dans lequel coulisse un piston; le four n'est pas intégré à la machine et le métal est déversé dans le conteneur avant chaque injection; ce sont les machines à chambre froide.
- Un dispositif d'éjection situé derrière le demi-moule monté sur le plateau mobile; une double plaque portant les éjecteurs est mise en mouvement par un vérin.

Ces machines sont également caractérisées par leur force de fermeture au niveau du plan de joint. La gamme des machines à chambre chaude va de 5 à 1 200 t. La gamme des machines à chambre froide va de 50 à 3 000 t.

En outre on utilise les machines à chambre chaude pour les alliages à bas point de fusion : plomb, étain, zinc, ... On utilise les machines à chambre froide pour les alliages avec un point de fusion plus élevé : alu et cuivre.



3.3.3 Moule

Il est constitué de deux blocs (en acier) fixés l'un sur un plateau fixe (coté injection de l'alliage), l'autre sur un plateau mobile (côté éjection de la pièce) (fig. 10.48).

À la fermeture du moule, les blocs sont centrés l'un par rapport à l'autre (goujons...); leur maintien en position fermée doit être efficace (par vérin de manœuvre...).

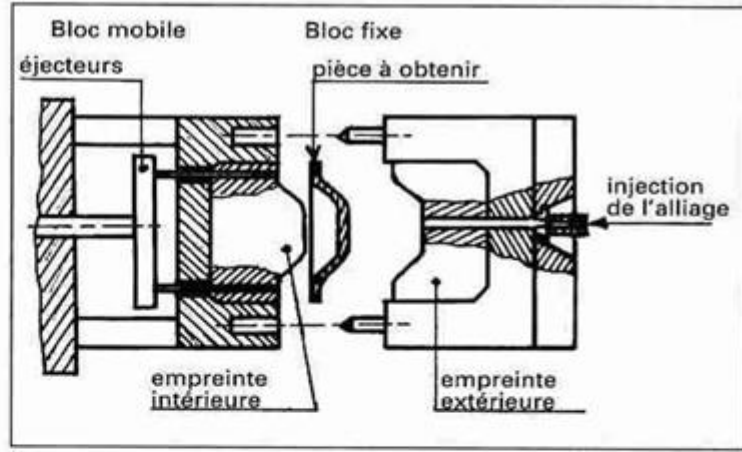


FIGURE 10.48 Schéma du poste de moulage de machine à moule haute pression.

Bloc fixe

Carcasse recevant l'empreinte (ou une grande partie) de formes extérieures de la pièce à obtenir.

Bloc mobile

Carcasse recevant l'empreinte des formes intérieures démontables dans le sens d'ouverture du moule.

Noyaux et broches

Ils sont fixes ou mobiles, selon leur position dans le moule.

Montés de préférence sur le bloc mobile, facilitant la venue de la pièce (démoulage).

Noyaux et broches fixes

Se démoulent dans le sens d'ouverture du moule.

Amovibles pour un remplacement périodique (fortes sollicitations thermiques et mécaniques) (fig. 10.49).

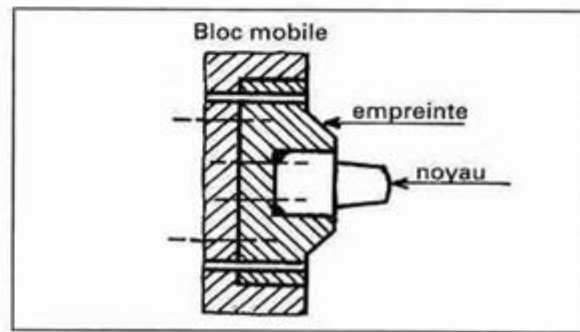


FIGURE 10.49 Noyau dans une empreinte de moule haute pression.

Broches très longues. Sont maintenues en position dans le demi-moule opposé (fig. 10.50).

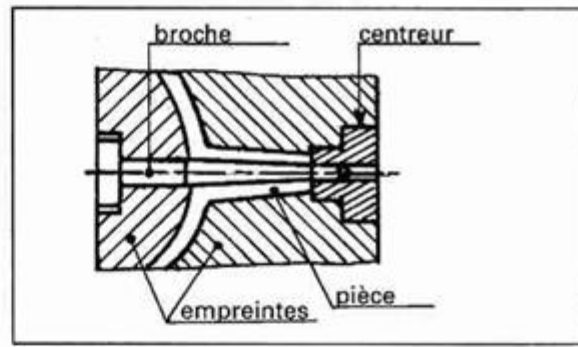


FIGURE 10.50 Broche longue dans un moule haute pression (maintenue dans les deux empreintes).

Noyaux et broches mobiles

Ne se démoulet pas dans le sens d'ouverture du moule. Guidés cylindriquement ou prismatiquement (en tiroir) dans le bloc : positionnement et dégagement automatiques.

Remplissage de l'empreinte

Il doit être effectué très rapidement en écoulement le moins turbulent possible pour opposition à : oxydation, formation de gouttes froides, émulsion air-alliage. Le temps de remplissage étant très court (quelques dixièmes de seconde au maximum) la vitesse de remplissage (20 à 50 m/sec) augmentera avec le minimum de toile de la pièce.

Diffuseur

Situé dans le bloc mobile, il dirige l'alliage dans la buse d'injection suivant le meilleur écoulement et réduit la quantité injectée (diffuseur, économiseur). La buse d'injection est située dans le bloc fixe. Le refroidissement du diffuseur et de la buse d'injection est nécessaire (circulation d'eau) (fig. 10.51).

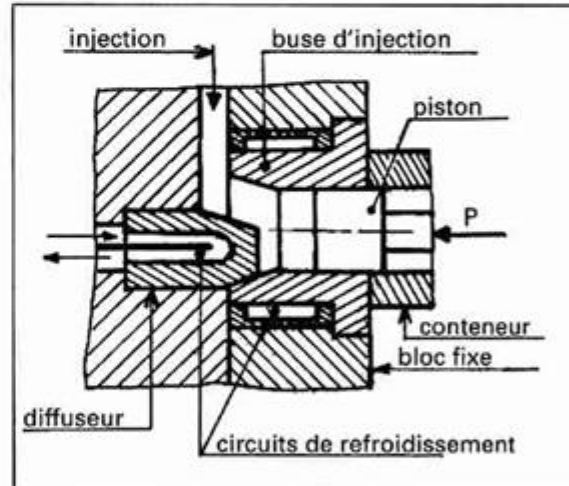


FIGURE 10.51 Schéma de diffuseur pour moule haute pression (en chambre froide).

Attaque de coulée

Elle assure l'écoulement de l'alliage et régule la vitesse de remplissage de l'empreinte. Elle est située, en principe, au droit des parties minces à couler. Une partie épaisse peut avoir son attaque spécifique ou plusieurs attaques (remplissage de deux côtés d'un noyau) (fig. 10.52).

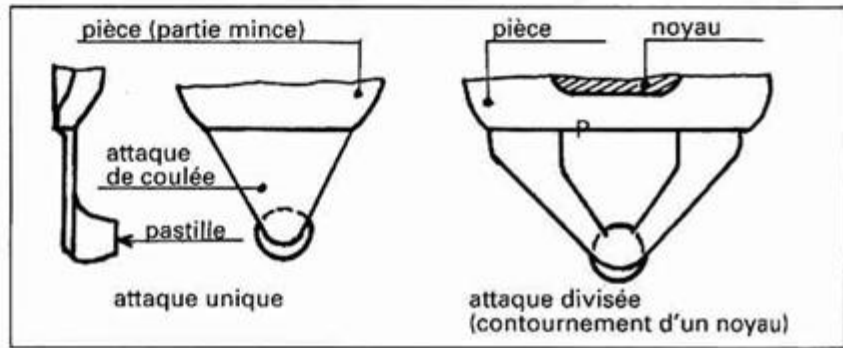


FIGURE 10.52 Attaques de coulée dans moule haute pression.

Une seule attaque est préférable pour les alliages d'aluminium (évite l'oxydation).
La hauteur de l'attaque est fonction de l'épaisseur de la toile des pièces à obtenir (2 à 3,5 mm pour pièces en alliages d'aluminium, 0,5 à 1,5 mm pour pièces en zamak).

Canal de coulée

Assure le remplissage sans perte de pression de la carotte à l'empreinte, d'où la condition : section de départ du canal \geq section de l'attaque (fig. 10.53).

Les canaux de coulée des moules utilisés sur machines de moulage à chambre chaude sont directs : réduction du temps de remplissage et de l'oxydation de l'alliage.

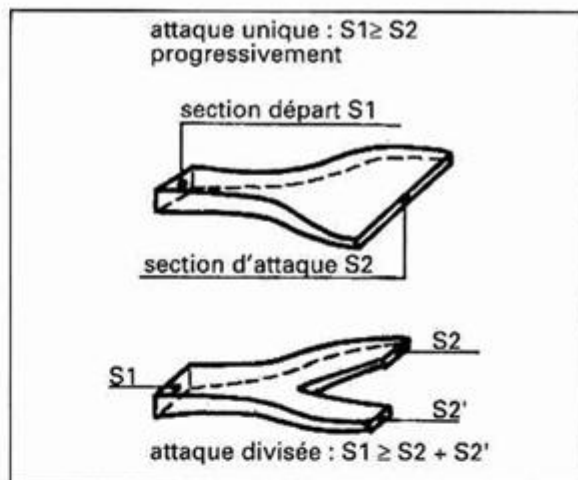


FIGURE 10.53 Canaux de coulée pour moules haute pression.

Dégorgeoirs, ou talons de lavage

Situés en opposition à l'attaque, ou contre des parties minces de la pièce : assurent le réchauffage localisé du moule et reçoivent les premières veines de l'alliage souillé d'oxydes et de gouttes froides.

Tirages d'air

Obtenus par : le jeu des assemblages mobiles du moule (noyaux, broches...) ; éventuellement, une saignée sur une face de joint du moule, à la suite du dégorgeoir.

Alimentation

Assurée, après remplissage, par la pression du piston d'injection sur l'alliage, durant sa solidification dans le moule.

La réserve d'alliage, carotte ou pastille, se situe dans la buse d'injection (du bloc fixe).

Système d'ouverture-fermeture-éjection

Ces mouvements sont effectués automatiquement et rapidement par un vérin.

Éjection de la pièce

Elle est obtenue, généralement, par des poussoirs (les éjecteurs) guidés par des plaques-supports.

Les éjecteurs de forme cylindriques et de petit diamètre (2 à 10 mm) sont situés avec répartition de l'effort, en face des parties massives de la pièce, du canal de coulée et du dégorgeoir (fig. 10.54).

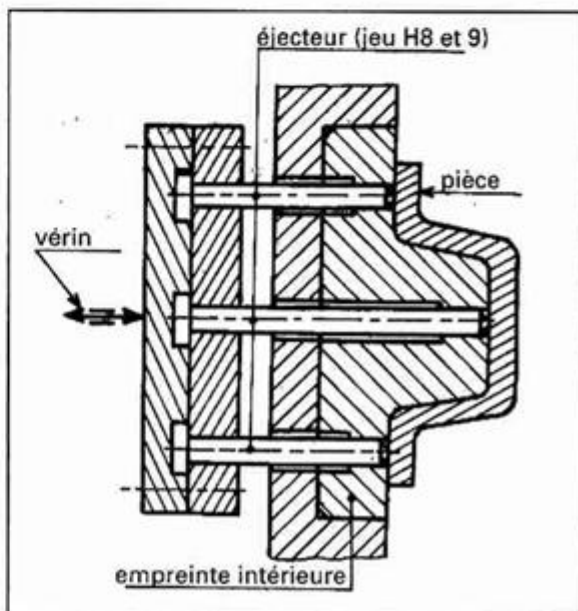


FIGURE 10.54 Système d'éjection de pièce dans moule haute pression.

3.3.4 Possibilités techniques

Les données ci-après peuvent être assurées par un moule dont la qualité de fabrication est courante en fonderie sous pression.

3.3.4.1 Tolérances générales

Les valeurs de tolérances sont fonctions de l'alliage coulé.

On distingue les cotes entre le plan de joint et la pièce, entre les deux moules, entre un moule et un noyau. On obtient couramment des valeurs aux environs de 0,1mm.

Types de cote et dimension L en mm		Alliages de zinc $\pm \Delta L$	Alliages d'Al et de Mg $\pm \Delta L$
A	$3 \leq L_1 \leq 20$	0,05	0,1
	$20 < L_2 \leq 100$	0,05 à 0,15	0,1 à 0,25
	$100 < L_3 \leq 300$	0,15 à 0,35	0,25 à 0,40
B	$3 \leq L_1 \leq 20$	0,1	0,15
	$20 < L_2 \leq 100$	0,1 à 0,25	0,15 à 0,35
	$100 < L_3 \leq 300$	0,25 à 0,70	0,35 à 0,75
C	$3 \leq L_1 \leq 20$	0,15	0,15
	$20 < L_2 \leq 100$	0,15 à 0,35	0,15 à 0,45
	$100 < L_3 \leq 300$	0,35 à 0,75	0,45 à 0,80

Pour les laitons, multiplier par 1,5 les valeurs données pour les alliages d'aluminium

Fig. 40 et tableau 9. Tolérances.

3.3.4.2 Epaisseur des parois

Elle peut être faible, de 0,5 à 3 mm, avec une dépouille de 0°30 à 1°30

3.3.4.3

Dimensions des pièces (mm)	Alliages injectés		
	Zinc	Al et Mg	Laiton
20 × 20	0,5 à 1	1 à 1,5	1,5 à 2
100 × 100	1 à 1,5	1,5 à 2	2 à 2,5
200 × 200	1,5 à 2	2 à 2,5	2,5 à 3
300 × 300	2 à 2,5	2,5 à 3	3 à 3,5

Tableau 7. Épaisseurs minimales possibles des parois.

Trous de petit diamètre

Ils s'obtiennent brut de coulée à partir du diamètre 3 mm, profondeur de 2 à 5 diamètres en moyenne (10 pour le zinc).

Les dépouilles des trous varient entre 0°30 et 2°30 en fonction des diamètres (la dépouille diminue quand le diamètre augmente).

Diamètres d (mm)	Hauteur maximale (mm)		
	Zinc	Al et Mg	Laiton
3	20	3	–
4 à 10	30 à 100	5 à 50	8 à 50
11 à 20	$10 \times d$	$5 \times d$	$5 \times d$

Tableau 8. Diamètres et profondeur des trous bruts.

3.3.4.4 Dépouilles

Elles sont de l'ordre de 1 à 2% suivant les alliages.

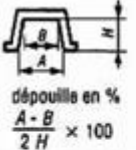
 dépolle en % $\frac{A-B}{2H} \times 100$	Alliages injectés		
	Zinc	Al et Mg	Laiton
	0,5 %	1 % à 1,5 %	1,5 % à 2 %

Tableau 10. Dépouilles.

Diamètres d (mm)	Hauteur maximale (en mm)		
	Zinc	Al et Mg	Laiton
3 à 5	2 %	4 %	–
5 à 10	1,7 %	2,5 %	3 %
10 à 20	1 %	1,5 %	2 %

Tableau 11. Dépouilles pour trous.

3.3.4.5 Petites pièces

Elles sont coulées en grappe, optimisant le coût du moule et la productivité.

3.3.5

3.4 Moulage en coquille sous basse pression

3.4.1

Procédé de moulage en moule permanent où l'alliage en fusion est injecté dans l'empreinte sous une pression de 0,2 à 2 bars (entre le remplissage et le masselottage).

Les différentes pressions, appliquées dans le four, font monter l'alliage dans le tube de liaison creuset-moule remplissant l'empreinte (fig. 57).

Généralités

Le alliages le plus souvent coulés par ce procédé sont des Al-Si et Al-Cu.

Utilisation : Production en grande série de pièces cylindriques courtes et plates de petites à moyenne dimensions et de masse maximale 100 kg.

3.4.2 Machines

Machines

Pour produire en grande série, chaque machine est conçue avec four de maintien en température de l'alliage et automatisation totale (coulée de l'alliage à extraction de la pièce). Elles sont de deux types : à injection verticale (le moule est au-dessus du four, avec tube d'injection plongeant dans le creuset) ; à injection oblique (le moule est dégagé du four).

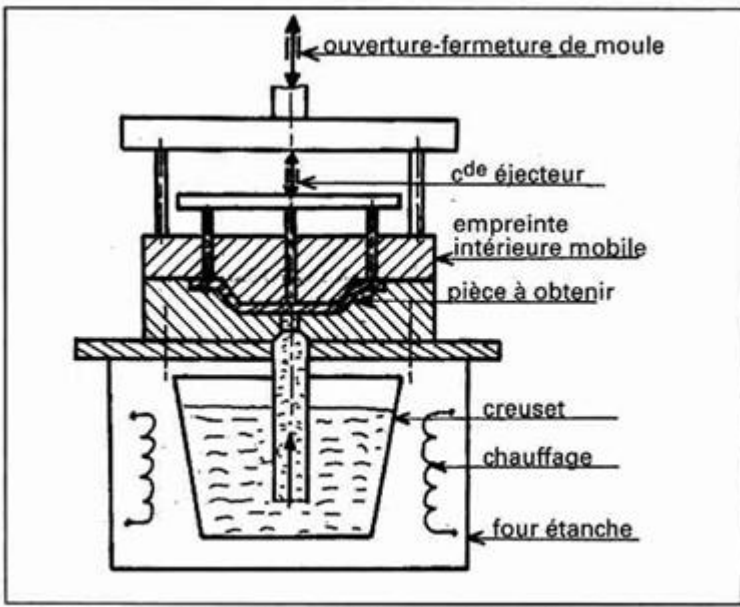


Schéma de principe de machine à mouler basse pression.

3.4.3 Moules

Métallique, situé au-dessus du creuset du four (étanche) de maintien en température. Les deux blocs constitutifs du moule se séparent au démoulage. Le démoulage peut être facilité par le dégagement du moule (basculement, rotation...).

Jeux fonctionnels de l'outillage

Ils sont de quelques dixièmes de mm (plus important qu'en haute pression, la température de régime du moule étant plus élevée).

Tirage d'air

Il est assuré par des rainures peu profondes (0,2 à 0,5 mm) et de faible largeur (10 à 20 mm) sur les joints de chape et portées de noyaux, débouchant à l'extérieur (directement ou par collecteur). Ces rainures sont évasées pour favoriser l'écoulement (fig. 10.58).

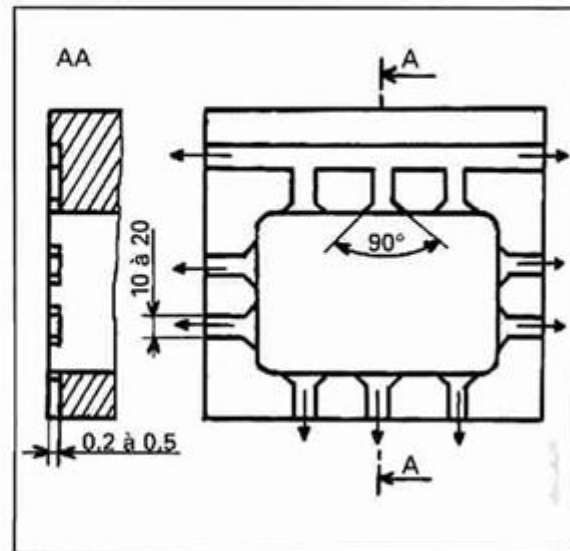


FIGURE 10.58 Tirage d'air sur joint de moule basse pression.

Conception

Elle est délicate, pour assurer la direction de la solidification. Une régulation thermique de certains éléments pourra être nécessaire, à la mise en production.

Remplissage de l'empreinte

Il s'effectue coulée par le bas en source. La pièce doit être située dans le moule, masses en bas, en liaison avec l'attaque de coulée et le masselottage. Remplissage et masselottage sont de même section (tube de liaison-injection) pour un remplissage non turbulent.

Plusieurs attaques de coulée

Alimentation d'une partie massive : le temps de remplissage doit être inférieur au temps de solidification de la plus faible épaisseur de paroi. Le diamètre du col de remplissage (la carotte) est fonction des pièces (poids, épaisseur des toiles, profil) (fig. 10.59).

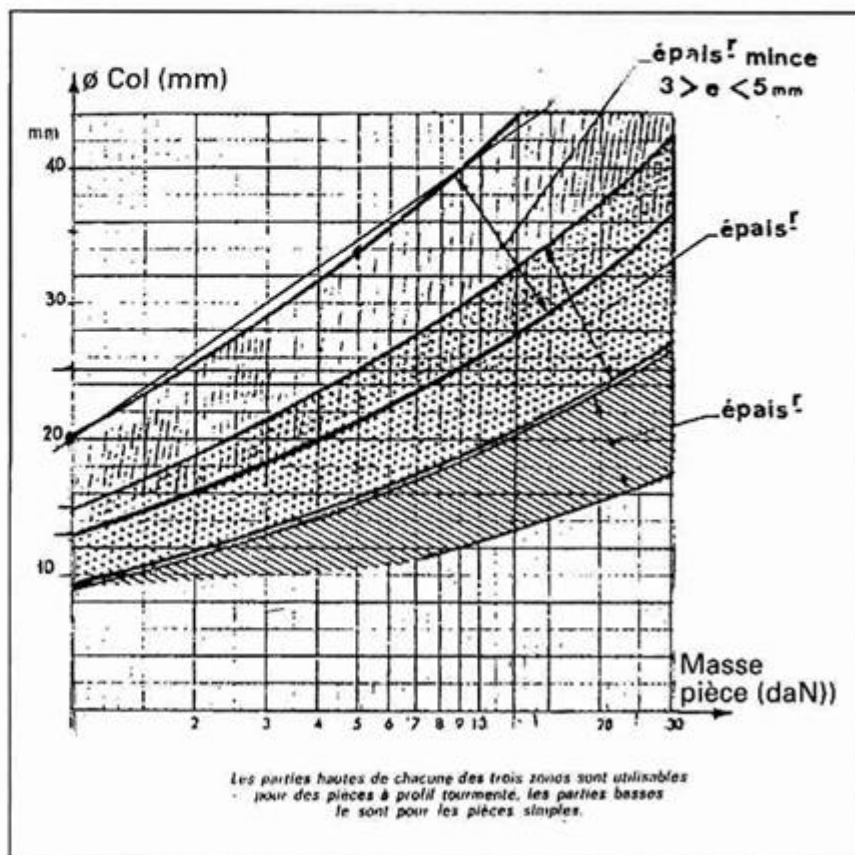


FIGURE 10.59 Diamètre des cols de remplissage pour moule basse pression. Doc. l'aluminium français.

3.4.4 Possibilités techniques

3.4.4.1 Précision

Précisions

La précision dimensionnelle obtenue est sensiblement inférieure à la coulée sous haute pression.
 La mise au mille est excellente, de 1,05 à 1,20 : la masselotte n'est pas solidifiée.
 La coulée en source provoque peu d'oxydation et la pression donne une venue de pièce comparable à la coulée en chute.

3.4.4.2 Conception

Conception des pièces

Elles doivent être conçues pour la coulée sous pression, avec une épaisseur progressive de l'attaque à l'extrémité opposée (haut de la pièce) (fig. 10.60).
 Elles auront un axe de symétrie (pièces cylindriques) avec une grande surface et une faible épaisseur.
 Les alliages utilisés ne doivent pas avoir une tendance à la criquabilité.

3.4.5 Comparatif des différents procédés

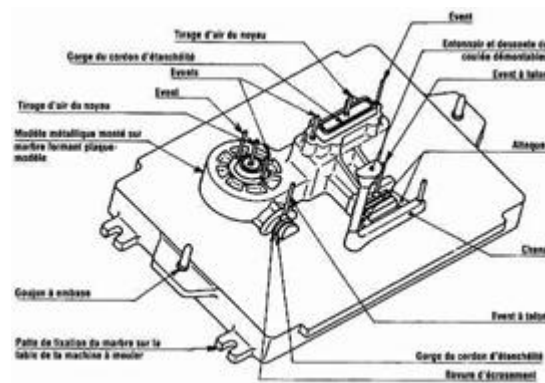
Possibilités techniques comparées (par classement des procédés)			
	Coquille	Basse pression	Sous pression
Cadence de coulée	3	2	1
Durée de vie du moule	1	1	3
Dimensions des pièces	1	3	1
Mise au mille	3	1	1
Légèreté des pièces	3	2	1
Précision dimensionnelle	3	2	1
Caractéristiques mécaniques	3	1	1
Traitement thermique	1	1	3
État de surface	3	2	1

Tableau 12. Possibilités techniques comparées.

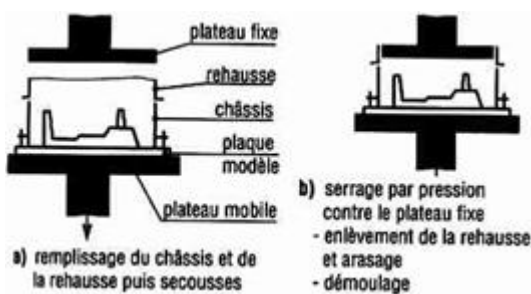
4 Moulage avec moule non permanent

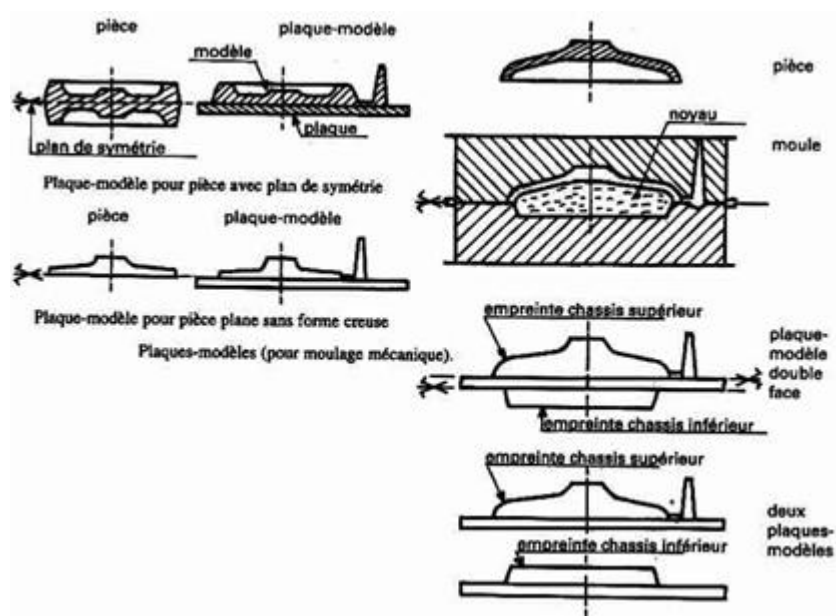
4.1 Moulage au sable

4.1.1 Principe



Le modèle (en bois ou métallique) est fixé sur une plaque (on parle alors de plaque modèle). Un châssis est placé autour pour réaliser les bords (réhausse). On complète le châssis avec du sable. On tasse par vibration ou pression. On retourne le châssis et on enlève le modèle (il ne faut donc pas avoir de contre-dépouille). On effectue de même sur l'autre partie de la pièce si nécessaire (sinon le châssis est entièrement rempli de sable). On reuses manuellement le trou de coulée. On assemble les deux châssis. On coule la pièce. On laisse refroidir et durcir. Pour démouler la pièce, on procède au décochage (vibrage) des deux châssis. Le sable se désagrège et la pièce peut être récupérée.





4.1.2 Utilisation

Suivant le type d'utilisation, on utilisera différents modèles :

- en bois tendre : unitaire à petite série (20 pièces). Modèle non réutilisable.
- En bois mi-dur à dur : jusqu'à 150 pièces.
- En bois renforcé métal ou plastique : jusqu'à 250 pièces.
- Modèle métallique : jusqu'à 10 000 pièces (usure).
- Modèle métallique modulaire : au delà de 10 000 pièces. Permet le remplacement des éléments usés.

4.1.3 Remarques complémentaires

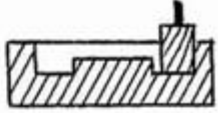
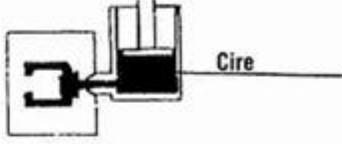
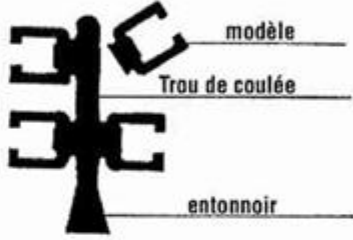



Dans le cas où la pièce à mouler comporte des parties évidées, celles-ci sont réalisées à l'aide de noyaux en sable placés dans le moule au moment de sa fermeture.


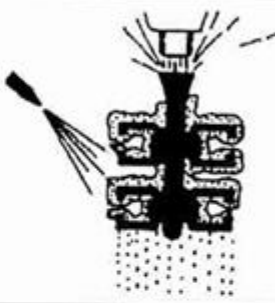
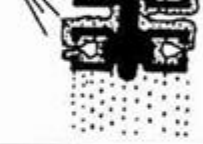

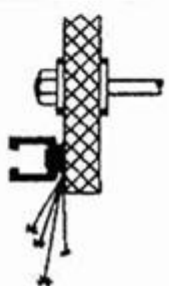
Le noyau doit être positionné pour éviter son écrasement.

Le noyau doit résister aux efforts engendrés par la pression du métal en fusion dans le moule.

4.2 Moulage à la cire perdue

4.2.1 Principe

USINAGE D'UN MOULE	Le moule constitué de deux coquilles est usiné dans de l'aluminium. Il peut être réalisé également en résine.	
INJECTION DES MODÈLES EN CIRE	La cire liquide à la température de 100 °C est moulée sous pression ou gravité dans le moule. Le modèle en cire est récupéré après refroidissement de celui-ci.	
CONSTRUCTION DE LA GRAPPE	Les modèles sont assemblés par collage ou soudure autour du trou de coulée. La grappe comporte des chenaux d'attaque, des tirages d'air et un entonnoir.	
BAIN DE BARBOTINE	La grappe est recouverte par trempage d'une première couche de barbotine. La barbotine est composée d'un mélange liquide à base de silice et de farine de sable réfractaire.	
CONSTITUTION DE LA CARAPACE	La couche de barbotine est renforcée par le dépôt d'une poudre réfractaire par bain ou projection d'épaisseur uniforme. Ce dépôt de céramique est réalisé en alternant un nouveau bain de barbotine et de poudre réfractaire.	
ÉLIMINATION DE LA CIRE	Dès que la carapace est solidifiée et séchée, la cire est évacuée par étuvage ou fondue au micro-onde. Pendant ce temps, la cuisson de la carapace se réalise.	

COULÉE DE L'ALLIAGE	L'alliage en fusion est coulé dans les moules, la carapace est chauffée également en fonction de la température de l'alliage à couler. La coulée doit se réaliser avec beaucoup de précautions pour éviter l'inclusion dans le moule d'oxydes qui se forment pour certains alliages.	
REFROIDISSEMENT	Le refroidissement est réalisé lentement pour éviter les chocs thermiques qui pourraient entraîner des déformations des pièces.	
DESTRUCTION DE LA CARAPACE	La couche réfractaire qui forme la carapace est détruite par jet d'eau sous pression ou décochage.	
SÉPARATION DES PIÈCES	Les pièces sont séparées de la grappe par tronçonnage ou sciage.	
ÉBAVURAGE	L'ébavurage des attaques de coulée après séparation sont usinées par meulage ou passage au ruban abrasif.	

4.2.2 Utilisation

Moulage manuel en production unitaire ou de petite série, de pièces de formes complexes, très petites à moyennes avec des alliages à mauvaise coulabilité.

Les précisions dimensionnelles et l'état de surface sont très bonnes. Les pièces peuvent être minces et surtout sans dépouilles ni plan de joint.

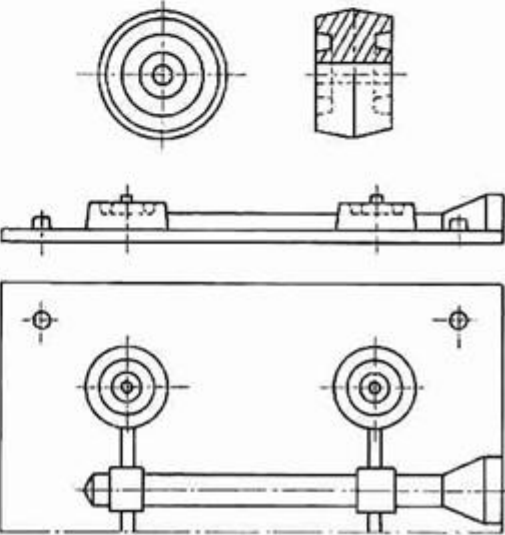
4.2.3 Remarques complémentaires

On peut aussi, sur le même principe, réaliser un moulage à partir d'un modèle gazéifiable en polystyrène expansé ou en résine (polyuréthane). Il faut alors faire attention au dégagement de vapeurs toxiques lors de la coulée.

Ce procédé permet la fabrication de pièces de petite taille en très grande série (coulée en grappe). On utilisera des achines spéciales permettant la coulée en dépression.

4.3 Moulage en carapace (procédé Croning)

4.3.1 Principe

CHAMP D'APPLICATION	<p>Ce procédé de moulage est assez récent. Il permet de réaliser des applications industrielles de précision. Il se rapproche du moulage en coquille par gravité et permet des tolérances dimensionnelles faibles :</p> <p>$\pm 0,1$ à $0,3$ mm pour les alliages et $\pm 0,25$ à 1 mm pour l'acier.</p> <p>Les éléments du moule sont réalisés à partir de plaques modèles sur lesquelles un mélange de sable et de résine thermodurcissable est appliqué. Sous l'action de la chaleur, une carapace se forme et l'on obtient une partie du moule.</p>	
COMPOSANTS DE LA CARAPACE	<p>• Préparation des composants à chaud :</p> <p>Sable : Sable siliceux pur contenant moins de 1 % d'argile, chauffé entre 140 et 175 °C</p> <p>Agglomérant : La résine (thermodurcissable) phénol-formol ou phénol-Crésol-formol.</p> <p>Agent durcisseur : L'agent durcisseur est l'hexaméthylène-tétramine (environ 14 %)</p> <p>Agent démoulant : Ajouter 0,1 % de stéarate de calcium.</p> <p>• Après malaxage et refroidissement rapide, l'on obtient un sable pré-enrobé prêt à l'emploi.</p> <p>• Préparation des composants à froid :</p> <p>Sable : sable siliceux pur contenant moins de 1 % d'argile</p> <p>Agglomérant : Dissolution de la résine dans un solvant volatil. Alcool éthylique dénaturé.</p> <p>Agent démoulant : Ajouter 0,1 % de stéarate de calcium</p> <p>• Malaxage de l'ensemble jusqu'à obtention d'un mélange sec pulvériseur, évaporation du solvant.</p>	
OUTILLAGES	<p>Les outillages mis en œuvre pour réaliser ce type de moulage sont assez coûteux – compte tenu de la précision des plaques modèle – ainsi que les machines à mouler ou à noyauter.</p>	
PLAQUE MODÈLE	<p>À partir du dessin de la pièce à obtenir après avoir placé les surépaisseurs d'usinage, le modelleur va définir une plaque modèle avec une ou plusieurs empreintes.</p> <p>La plaque modèle est réalisée avec des matériaux qui résistent à la chaleur.</p> <p>Grandes séries : Fonte – Acier</p> <p>Moyennes séries : Bronze – Alliages légers</p> <p>Les éléments de positionnement sont prévus, un bossage pour un trou, un trou pour un bossage.</p> <p>Le trou de coulée avec son entonnoir, les attaques sont prévues sur la plaque modèle.</p> <p>Il faut réaliser deux plaques modèles pour composer un moule.</p>	

<p>FABRICATION DE LA CARAPACE</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La plaque modèle placée sous un châssis est chauffée à 720 °C, elle est recouverte du mélange résine – sable. Sous l'action de la chaleur en 15 secondes, une carapace d'environ 5 mm d'épaisseur se forme. • Le retournement de l'ensemble permet d'évacuer l'excédent de mélange. • La plaque modèle et la carapace sont placées dans une étuve à une température de 300 à 400 °C pour terminer la cuisson pendant quelques minutes. • La carapace est séparée ensuite de la plaque modèle. 	
<p>RÉSULTAT</p>	<p>Les deux carapaces réalisées sont pratiquement identiques, elles sont différenciées par les éléments de positionnement. L'une comporte quatre goujons. L'autre comporte quatre trous. Le moule sera constitué après collage des deux carapaces ; au préalable, les noyaux auront été positionnés.</p>	
<p>TYPES DE MOULES</p>		
<p>MOULAGE</p>	<p>Les moules sont placés verticalement ou horizontalement dans des châssis remplis de sable ou de grenaille pour en assurer le calage. Les alliages moulés sont à la même température de fusion que pour les autres procédés de moulage. Le poche de coulée doit être dégrassé au préalable pour éviter l'introduction d'oxydes métalliques. Le décochage des pièces est réalisé par rupture des carapaces.</p>	<p>POSITIONNEMENT DE MOULES VERTICAUX</p> <p>Documentation : Dessins Dossier de Technologie de Construction André Ricordeau – Claude Corbet Éditions CASTEILLA.</p>

4.3.2 Utilisation

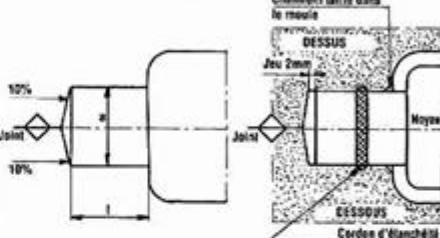
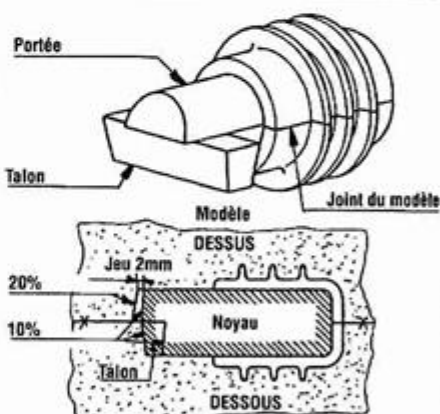
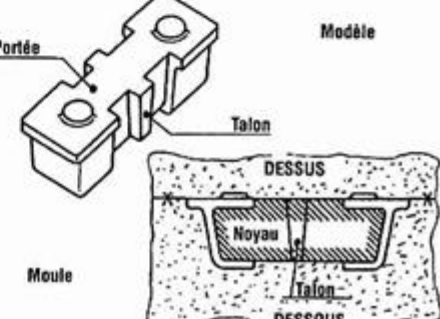
Production de petite à grande série de pièces aux dimensions moyennes à très petites qui nécessitent précisions dimensionnelles et d'état de surface.

4.3.3 Remarques complémentaires

Ce système est une alternative à la boîte à noyaux pour fabriquer les noyaux métalliques.

4.4 Etude des noyaux

4.4.1 Principe

<p>EMPLOI</p>	<p>Les noyaux sont les parties rapportées à l'intérieur d'un moule qui permettent de réaliser des formes intérieures ou des formes extérieures en contre-dépouilles. Ces noyaux en sable doivent se placer facilement à l'intérieur du moule et rester positionnés pendant le remplissage de l'empreinte.</p>	
<p>PORTÉES DE NOYAUX</p>	<p>Les formes des portées de noyaux ne sont pas normalisées, par contre elles doivent répondre à des règles précises :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Assemblage et positionnement précis - Stabilité dans le moule - Tirage d'air. <p>L'étude de chaque type de portée est un cas unique.</p>	<p>Types de portées</p> <ul style="list-style-type: none"> - Portées dans le plan de joint du moule ordinaire ou à talon. - Portées verticales - Portées déportées - Portées montantes - Portées bouchon - Portées de paroi.
<p>PORTÉES DANS LE PLAN DE JOINT</p>	<p>• Portées simples Dans le cas d'un moulage à la main ou de petites séries, les portées sont rudimentaires - de formes généralement cylindriques. Les jeux de remoulage et de coiffage sont respectés.</p>	
<p>PORTÉE À TALON POUR NOYAU DE PAROI</p>	<p>• Portées à talon Dans le cas d'un remoulage dans le plan de joint, le noyau peut porter un talon. Ce talon permet d'assurer la stabilité et le positionnement dans le cas d'une portée simple.</p> <p>Exemple : Le talon de grande dimension sert d'encastrement du noyau dans l'empreinte du moule.</p>	
	<p>Dans le cas d'un noyau de paroi, les portées à talon permettent de positionner et repérer celui-ci lors du remoulage.</p> <p>Exemple : Réalisation de deux pièces identiques simultanément dans un moule.</p>	

<p>PORTÉES VERTICALES</p>	<p>Les noyaux placés verticalement dans les moules doivent avoir un positionnement rigoureux, pour éviter de se trouver écrasés au moment du remmoulage de la partie supérieure.</p> <p>Les portées sont identifiées par des dépouilles différentes :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Portée inférieure : pente 10 % – Portée supérieure : pente 20 % <p>Dans le cas des portées inférieures, un cordon d'usure est prévu afin de réaliser un espace dans lequel les déchets de sable qui peuvent éventuellement se détacher vont être regroupés sans gêner le remmoulage.</p>	
<p>PORTÉES MULTIPLES</p>	<p>Dans les moules à portées multiples, les noyaux comportant des portées horizontales et verticales sont soumis aux mêmes règles que pour les portées simples.</p> <p>Pour éviter une obturation des parties ouvertes de la pièce moulée, prévoir un arrêt de la matière en fusion en partie supérieure.</p> <p>FIGURE A : un cordon d'étanchéité placé sur le dessus du noyau assure cet arrêt.</p> <p>FIGURE B : une portée brise-bavure avec cordon d'étanchéité est prévue sur le noyau.</p>	
<p>PORTÉES MONTANTES</p>	<p>Les portées montantes permettent de simplifier un moule.</p> <p>La suppression de la contre-dépouille permet de n'avoir qu'un seul plan de joint.</p> <p>Le plan de joint de remmoulage du noyau est déporté à l'intérieur de l'empreinte.</p> <p>FIGURES A : Noyau en trois parties : un noyau cylindrique et deux noyaux galettes dans les empreintes des portées.</p> <p>FIGURES B : Noyau unique placé dans l'empreinte des portées. La boîte à noyau est plus complexe.</p>	

5 Bibliographie

Mémotech - Procédés de mise en forme des matériaux – C. Corbet

Mémotech – Dessin industriel – C. Hazard

Précis de Construction mécanique Tome 2 – Projets-méthodes, production, normalisation – J.P. Trotignon

Guide de l'usinage – Delagrave

Techniques de l'ingénieur

Fiche de Synthèse

Procédé : Moulage en coquille par gravité

Principe du procédé :

On coule le matériau, rendu liquide dans un four, dans une forme. Cette forme est réalisée par une empreinte dans un moule. Le moule est séparable en deux parties pour permettre le démoulage. Le moule est réalisé en métal. Les formes intérieures sont réalisées par des noyaux ou des broches.

Procédés associés : le moulage sous haute pression ou sous basse pression sont dérivés de ce procédé.

Utilisation :

Le prix des outillages est assez élevé. Le seuil de rentabilité est supérieur à 2 000 pièces.

Capabilités :

- Matériaux : Alliages à bas point de fusion : aluminium, magnésium, cuivre, zinc (sauf acier et fonte)
- Poids des pièces : quelques grammes à plusieurs tonnes. Dépend du matériau.
- Tolérances dimensionnelles : $\pm 0,35$ à $\pm 3,5$ mm suivant la cote tolérancée.
- Surépaisseurs d'usinage : de l'ordre de 1 à 3 mm suivant les dimensions de la pièce.
- Epaisseur mini des parois : 2 à 10 mm suivant le matériau.
- Retrait : 1 à 2% suivant l'alliage.
- Rugosité : $R_a = 6,3$ à $3,2$ (jusque 1,6 sous pression)
- Trous : diamètre mini 15 mm environ.

Critères de conception :

- Faciliter l'écoulement : On s'arrange pour orienter la matière au mieux. Il faut éviter les endroits non remplis.
- Garder une épaisseur constante : L'écoulement est plus rapide dans les zones de forte épaisseur. On s'arrange pour avoir une épaisseur constante sur toute la pièce.
- Arrondis : on évite les angles vifs qui favorisent les concentrations de contraintes, augmentent la difficulté d'usiner les moules, empêche le bon écoulement de la matière.
- Homogénéité de la matière : aucun problème pour ces matériaux.
- Retrait : La solidification s'effectue en partant des bords. On positionne des masselottes pour éviter la formation de retassures aux derniers points de solidification.
- Dépouilles : $2,5^\circ$ sur le premier moule enlevé. $1,5^\circ$ sur l'autre; la pièce reste serrée sur ce moule.
- Nervures : de l'épaisseur des parois. Attention à l'accumulation de matière au niveau du raccord nervure-bord.
- Démoulage : On évite les contre-dépouilles (surfaces mal orientées par rapport au plan de joint).
- Filetages et taraudages : on ne peut pas les créer directement. Il faudra les usiner.
- Trous : On augmente l'épaisseur de la paroi aux environs du trou. Les trous trop petits ou excentrés devront être usinés.
- Events : On troue le moule aux endroits où l'air reste prisonnier lors du moulage pour qu'il puisse s'échapper.

Fiche de Synthèse

Procédé : Moulage au sable

Principe du procédé :

On coule le matériau, rendu liquide dans un four, dans une forme. Cette forme est réalisée par une empreinte dans un moule. Le moule est séparable en deux parties pour permettre le démoulage. L'empreinte est réalisée en bois ou en métal. Le moule est en sable. Les formes intérieures sont réalisées par des noyaux en sable ou métal.

Procédés associés : le moulage en carapace et le moulage à la cire perdue sont dérivées de ce procédé.

Utilisation :

De la pièce unitaire jusqu'aux séries de plus de 10 000 pièces. On choisit l'empreinte en fonction du nombre de pièces à fabriquer.

Capabilités :

- Matériaux : Tous les matériaux métalliques.
- Poids des pièces : quelques kilos à plusieurs tonnes. Dépend du matériau.
- Tolérances dimensionnelles : $\pm 0,5$ à ± 10 mm suivant la cote tolérancée.
- Surépaisseurs d'usinage : de l'ordre de 2 à 20 mm suivant les dimensions de la pièce.
- Epaisseur mini des parois : 3 à 50 mm suivant le matériau.
- Retrait : 1 à 2,5% suivant l'alliage.
- Rugosité : $R_a = 6,3$ à $12,5$
- Trous : diamètre mini 20 mm environ.

Particularités du procédé :

Les moules et les noyaux en sable sont détruits pour démouler la pièce. Il faut donc créer un outillage complet (deux moules + tous les noyaux) pour créer une pièce.

Critères de conception :

Identiques au moulage en coquille par gravité sauf particularités énoncées ci-dessus.

Fiche de Synthèse

Procédé : Moulage à la cire perdue

Principe du procédé :

On réalise une empreinte en cire. Cette empreinte est réalisée en associant la pièce à réaliser, les masselottes et le trou de coulée. On trempe cette cire dans une matière réfractaire liquide pour créer une carapace. On enlève ensuite la cire par chauffage et fusion. On peut alors couler l'alliage dans la carapace. Après refroidissement, on casse la carapace par jet d'eau ou décochage.

Procédés associés : modèle perdu en résine ou en polystyrène.

Utilisation :

Très utilisé pour les pièces de petites dimensions coulées en grappe. On réalise donc des très grandes séries (plus de 100 000 pièces).

Capabilités :

- Matériaux : Tous les matériaux métalliques.
- Poids des pièces : quelques grammes à quelques kilos. Dépend du matériau.
- Tolérances dimensionnelles : $\pm 0,1$ à $\pm 0,5$ mm suivant la cote tolérancée.
- Surépaisseurs d'usinage : de l'ordre de 0,7 à 4,5 mm suivant les dimensions de la pièce.
- Epaisseur mini des parois : 2 à 5 mm suivant le matériau.
- Retrait : 1 à 2,5% suivant l'alliage.
- Rugosité : $R_a = 1,6$ à $0,8$
- Trous : diamètre mini 15 mm environ.

Particularités du procédé :

L'empreinte et le moule sont détruits pour chaque pièce. On a donc pas de plan de joint. Donc pas de dépouille ni d'éjecteurs.

Critères de conception :

Identiques au moulage en coquille par gravité sauf particularités énoncées ci-dessus.