

CI 6 – PPM – PRODUITS PROCÉDÉS MATÉRIAUX

ÉLABORATION DES PIÈCES MÉCANIQUES. INTRODUCTION DE LA CHAÎNE NUMÉRIQUE.

CHAPITRE 4 – PROCÉDÉ DE MOULAGE – CONCEPTION DES PIÈCES MOULÉES



*Noyau pour moulage
de moteur – Moule en
sable [?]*



*Moules pour l'injection
plastique [?]*



*Grappe d'aubes pour
moulage à la cire
perdue [?]*



*Machine de
rotomoulage [?]*

Le fonderie est un procédé de mise en forme qui consiste à verser un matériau à l'état liquide dans un moule et à retirer ce matériau après solidification. La difficulté est alors de réaliser le moule.

Suivant la nature du matériau, la taille de la série, la géométrie de la pièce il existe plusieurs procédés de moulage :

- moulage au sable ;
- moulage en coquille ;
- moulage à la cire perdue ;
- injection plastique ;
- moulage RTM.

Le but de ce cours n'est pas de détailler tous ces procédés de moulages, mais de décrire en particulier le moulage au sable. Pour ce procédé, le moule est dit **destructible** et le **modèle non destructible**. Quelques généralités sur l'injection plastique seront introduites.

Savoir

SAVOIRS :

- Connaître le procédé d'obtention des pièces moulées
- Savoir concevoir une pièce moulée

Ce document évolue. Merci de signaler toutes erreurs ou coquilles.

1 Obtention des pièces métalliques moulées en moule non permanent, à modèle permanent

1.1 Applications de la fonderie

Contrairement au forgeage, la fonderie permet d'obtenir des pièces creuses à cavités complexes (culasses de moteur, bâtis de machine).

On peut obtenir des pièces de forme complexes qu'il suffira d'usiner localement. L'approche de la forme définitive de la pièce permet un gain de temps et de matière.



Cartier moulé de boîte de vitesse [?]

Il est possible de réaliser des pièces en matériaux difficilement usinables à l'outil de coupe :

- ailettes de turbines ou de turbo réacteurs ;
- outils de coupe en acier rapide (fraise) ;
- ...

Il est possible de réaliser des pièces en matériaux non malléables.

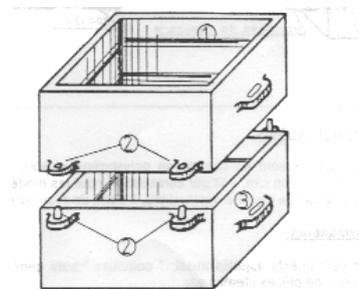
Les alliages moulés ont les mêmes propriétés dans toutes les directions de l'espace (isotropie). Le forgeage et le laminage ne permettent pas d'obtenir cette propriété.

Les problèmes de moulage sont essentiellement des problèmes d'ordre géométrique.

1.2 Description générale du procédé

Ici, les moules sont détruits après la coulée. Ces moules sont généralement en sable dont la cohésion est améliorée par addition d'argile, de ciment ou de résine et par passage à l'étuve.

Après avoir coulé le matériau en fusion et une fois la matière solidifiée, on procède à la destruction de moule pour extraire la pièce. On réalise donc autant d'empreintes (ou de moules) que de pièces à couler.



CHASSIS DE FONDERIE

- 1 Formes intérieures permettant de retenir le sable.
- 2 D.-positif d'indexage.
- 3 Poignées et organes de manutention.

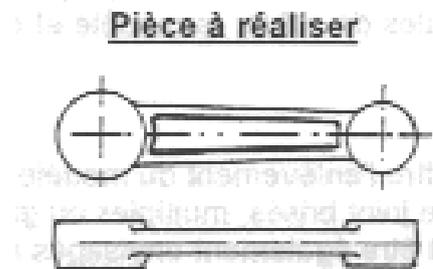
Pour ce type de moule, l'empreinte s'obtient à partir d'un **modèle permanent** que l'on imprime dans le sable et dont la forme correspond à celle de la pièce à obtenir.

Le moulage en moule non permanent à modèle permanent regroupe les technologies de moulage au sable, de moulage en céramique, de moulage à la cire perdue.

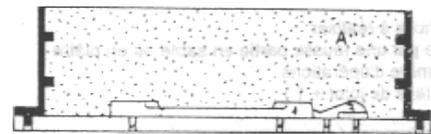
Ces procédés sont utilisés pour des pièces de moyennes à grandes dimensions et pour des productions pouvant aller de l'unité jusqu'à la grande série.

La fonderie en sable est cependant conditionnée par des problèmes de manutentions du sable et des châssis.

Pour illustrer le processus de fonderie au sable, prenons l'exemple de la réalisation d'une bielle.

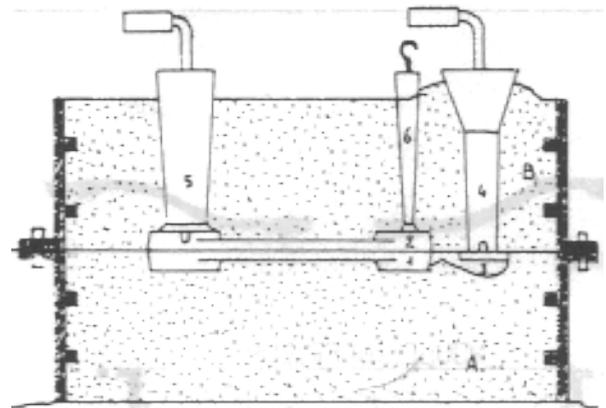


- Mise en place sur la plaque « porte modèle » de la partie 1 du moule et de l'attaque (3)
- Apport du sable et tassage
- Retournement de l'ensemble
- Enlèvement de la plaque modèle

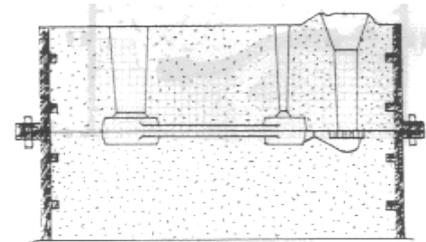


- Mise en place du talc sur le plan de joint de A pour éviter le collage avec le sable de B
- Mise en place :
 - du châssis supérieur
 - de la partie 2 du modèle
 - du mandrin de masselotte 5
 - du mandrin d'évent 6
 - du mandrin du trou de coulée 4
- Apport du sable et tassage
- Enlèvement de 4, 5, 6
- Enlèvement et retournement de B
- Enlèvement du modèle 1,2,3

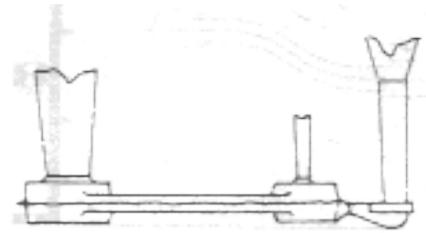
- Rectification de l'empreinte



- Remise de B sur A
- Coulée
- Refroidissement
- Effondrement du moule (marteau piqueur, chute libre, table vibrante)
- Récupération de la pièce brute
- Décochage
- Ébarbage



- La masselotte est un appendice constituant une réserve de matière de métal liquide capable d'alimenter les carences causées par la contraction du métal au refroidissement dans la phase liquide + solide.
- Évent : appendice permettant l'évacuation des gaz
- Trou de coulée : appendice vertical pour l'alimentation de l'empreinte en métal liquide
- Attaque : raccord entre le trou de coulée et l'empreinte.



Pièce brute de coulée

Remarques :

- Pour pouvoir retirer le modèle du moule, il faut que les surfaces du modèle perpendiculaire au plan de joint soient en dépouille pour ne pas entraîner des particules de sable, le modèle et donc la pièce seront donc légèrement coniques. **L'angle de dépouille est de l'ordre de 2 à 3 degrés.**
- Il faut faire un choix judicieux du plan de joint pour permettre l'enlèvement du modèle. La forme de certaines pièces peuvent conduire au choix de plans de joint brisés, multiples ou gauches. Ces problèmes sont traités par le mouleur mais ils doivent également être envisagés par le bureau d'étude lors de la conception de la pièce :
 - un plan de joint gauche ou brisé est plus difficile à réaliser (la plaque porte modèle est remplacée par une fausse partie en sable ou en plâtre) ;
 - des plans de joint multiples multiplient le nombre d'opérations (nombre de châssis = nombre de plans de joint +1).

1.3 Matériaux

1.3.1 Matériaux utilisables en moulage en moule non permanent

Ce procédé de moulage est utilisable pour des types différents de métaux :

- fontes lamellaires et malléables ;
- aciers ;
- aluminium et alliages ;
- cuivre et alliages ;
- alliages divers.

Du fait de l'utilisation de moules en sable, les métaux ayant une haute température de fusion seront moulables en moules non permanents.

1.4 Réalisation des formes extérieures

1.4.1 Matériaux constituant les moules destructibles

Il existe une grande multitude de sables utilisables dans le cadre du moulage. Les sables sont choisis en fonction :

- de leur prix de revient ;

- de leur aptitude à être recyclée ;
- de leur tenue à la température, à la pression ;
- de la taille des pièces ;
- du matériau moulé...

On distingue par exemple :

- le sable à vert : caractéristiques détaillées ci-après ;
- le sable à vert séché grillé flambé : accroissement de la dureté du sable ;
- le sable à vert étuvé : moule rigide sans humidité ;
- les sables agglomérés : la plupart sont utilisés pour réaliser les noyaux.

Pour les moules destructibles, le sable est justement utilisé pour son aptitude à être détruit pour démouler la pièce. Il a de plus la faculté de ne pas changer d'état pour des hautes températures (supérieures à 1500°C). Il résiste donc à la température lors de la coulée de la pièce.

1.4.2 Moulage et organes de coulée

Le moule doit comporter au moins deux parties (quelquefois plus) pour permettre l'extraction du modèle.

Chaque partie est enfermée dans un châssis. Il s'agit d'une caisse métallique, sans fond, démontable, et dont les formes intérieures permettent de retenir le sable.

Le plan de jonction de deux châssis est appelé plan de joint. Lorsque deux châssis sont superposés, ils sont **indexés** l'un par rapport à l'autre.

(moule, descente de coulée, chenaux d'alimentation, masselotage, refroidissement)

1.4.3 Procédé d'obtention du modèle

Les modèles sont généralement réalisés en bois. Ils sont donc réalisés manuellement par des menuisiers ou ébénistes spécialisés.

1.5 Réalisation des formes intérieures

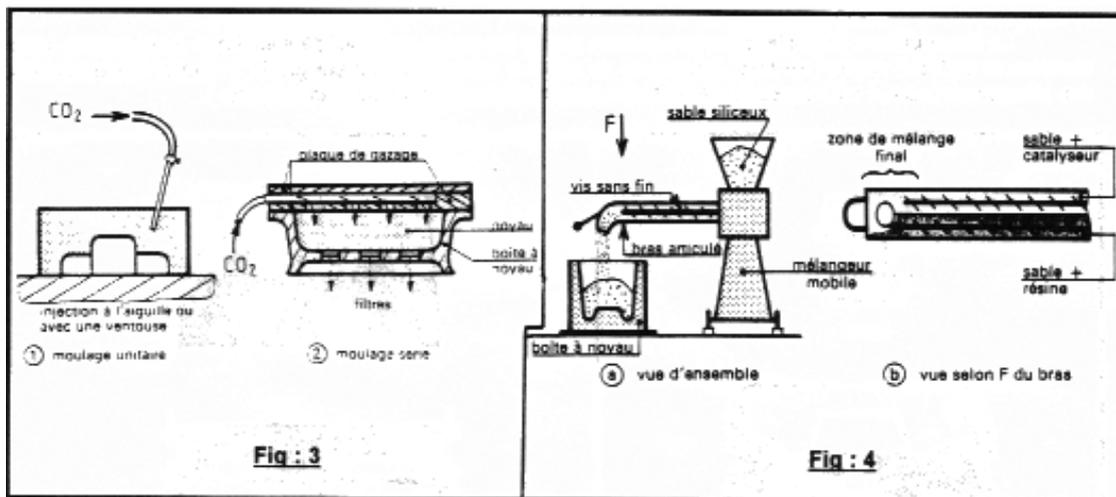
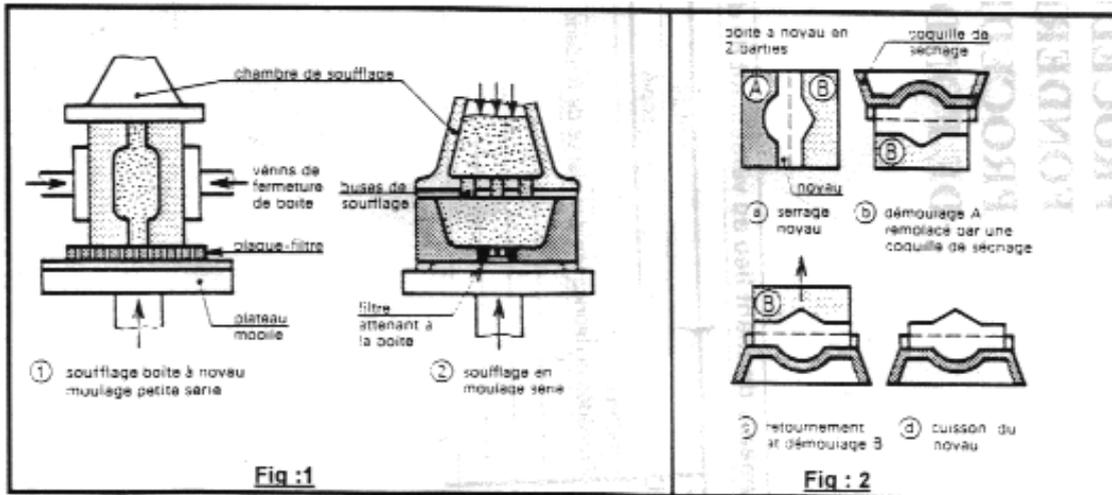
1.5.1 Matériaux utilisés pour les noyaux

Les noyaux sont réalisés en sables agglomérés. On distingue parmi eux :

- le sable à l'huile ;
- le sable aux résines thermodurcissables : employé pour le noyautage en grande série. Le sable enrobé de résines est soufflé dans une boîte à noyau métallique chauffée à 180°C. Durcissement en 10 secondes environ ;
- sable aggloméré aux résines à prise à froid grâce au procédé du silicate de soude. Le durcissement est obtenu en quelques secondes par injection dans le sable de gaz carbonique ;
- *etc.*

1.5.2 Procédé d'obtention du noyau

Les noyaux sont obtenus par agglomération de sable. Ils sont généralement agglomérés dans des «moules» appelées boîte à noyau. Suivant le type de sable utilisé, le procédé de fabrication peut différer.



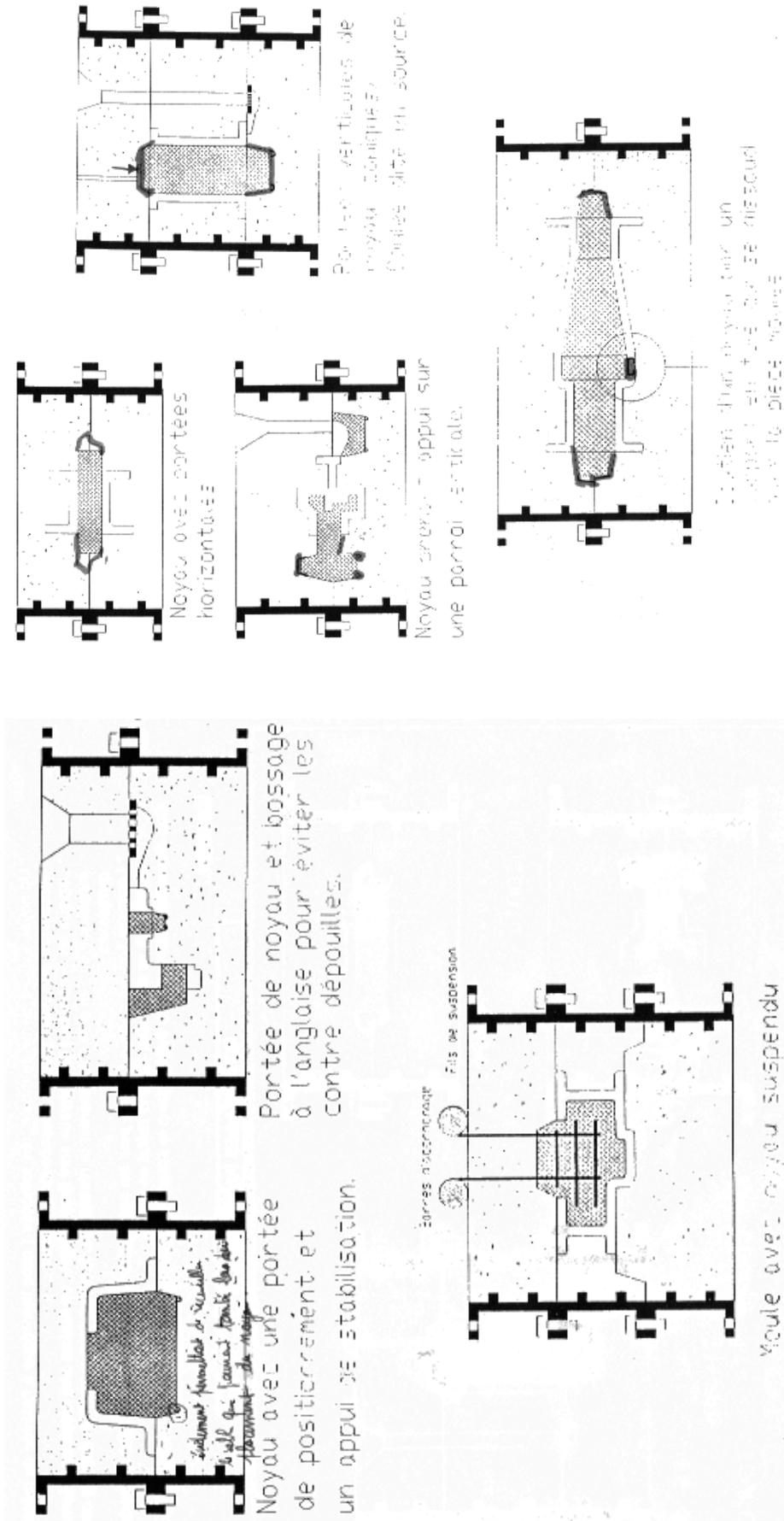
1.5.3 Dessin de noyau et portées associées

Un noyau est une partie du moule très sollicitée (choc thermique à l'arrivée du métal, choc mécanique, poussée d'Archimède ...)

Lorsque les dimensions des noyaux sont importantes, on réalise une armature interne métallique qui, en plus d'augmenter la résistance, favorise leur extraction dans les cavités complexes.

Lorsqu'ils sont en porte-à-faux on peut les suspendre ou les déposer sur des supports métalliques destinés à se dissoudre dans le métal en fusion.

Ces dispositions doivent être évitées dans la mesure du possible par un tracé judicieux de la pièce.



2 Conception des pièces moulées

2.1 Généralités

3 principaux acteurs interviennent dans le déroulement de la fabrication d'une pièce moulée :

- le concepteur : il définit parfaitement les exigences fonctionnelles et les caractéristiques mécaniques de la pièce ;
- le préparateur : il organise le travail de réalisation, il a la charge de la fabrication du produit, il prévoit les outillages, il minimise les usinages, il définit ainsi un **brut minimal de fonderie** ;
- le fondeur : il a la charge d'élaborer la pièce coulée en respectant les exigences citées antérieurement, qui conditionnent la solution envisagée et donc le prix de revient de la pièce à fabriquer.

Idéalement, la solution serait d'obtenir directement la pièce la plus économique possible avec le déroulement concepteur, préparateur, fondeur sans concertation pour obtenir les délais les plus courts. Évidemment, cette solution n'existe pratiquement pas et des concertations sont nécessaires pour parvenir à la solution la plus intéressante.

Lors de la conception, le concepteur doit tenir compte des exigences de fabrication de la pièce pour obtenir la solution la plus économique.

Pendant toutes les phases de fabrication d'une pièce moulée (moulage, coulée, refroidissement, démoulage, décochage...) un certain nombre de phénomènes physiques sont mis en jeu. Ces phénomènes également appelés «facteurs de fonderie», sont très nombreux et dépendent souvent les uns des autres. Ils conditionnent la bonne qualité de la pièce moulée.

Ces facteurs de fonderie sont relatifs :

- à la nature du métal ou des alliages et à ses propres propriétés physiques : conductivité thermique, coefficient de dilatation, ségrégation ;
- aux conditions de fusion : température de chauffe et de fusion, atmosphère dans le cubilot... ;
- aux conditions de coulée : température de coulée, débit, pression ... ;
- au moule : forme, matériau, conditionnement, température... ;
- à la forme et aux dimensions de la pièce à fabriquer.

Le concepteur est concerné par le tracé des pièces moulées. Il doit en effet :

- éviter les défauts dus à certaines propriétés physiques du métal ;
- éviter les défaillances des moules, des noyaux, des modèles ;
- simplifier ou minimiser toutes les opérations de moulage de la pièce.

Analysons les différents défauts de fonderie pour en tirer des règles générales afin que le concepteur puisse réaliser le tracé le plus performant possible de la pièce moulée.

On peut diviser ces règles en trois groupes :

- les lois techniques de moulage avant et après la coulée : simplifier et minimiser les opérations de moulage, les rendre les plus faciles et plus fiables etc. ;
- les lois physiques de formation pendant la coulée et la solidification : fusion, écoulement, coulabilité, retrait, hétérogénéité ;
- les lois de fonctionnement de la pièce : condition de résistance.

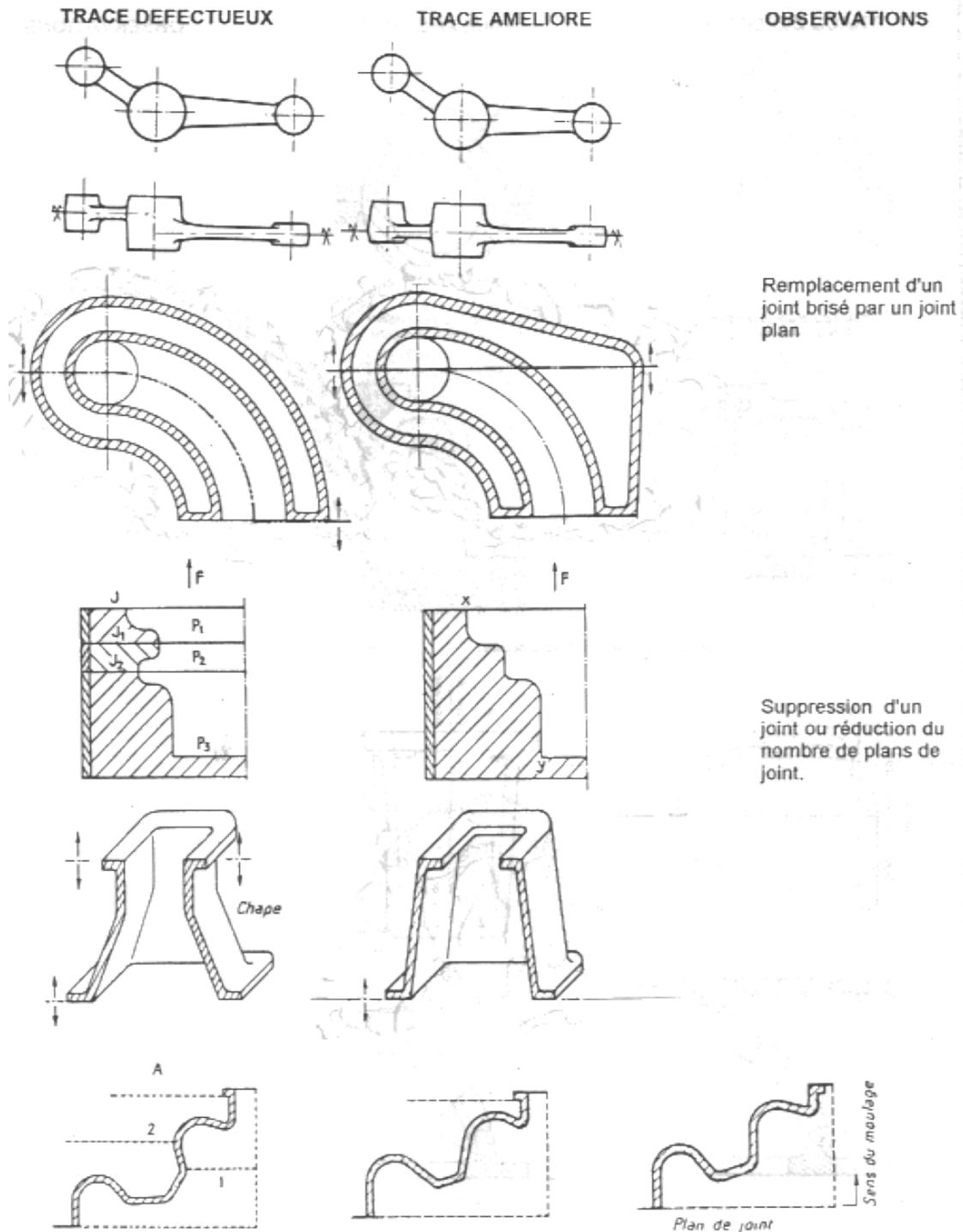
Ces problèmes sont parfois antagonistes, le constructeur en tiendra compte en fonction de la réalisation spécifique le concernant.

2.1.1 Lois techniques de moulage avant et après la coulée

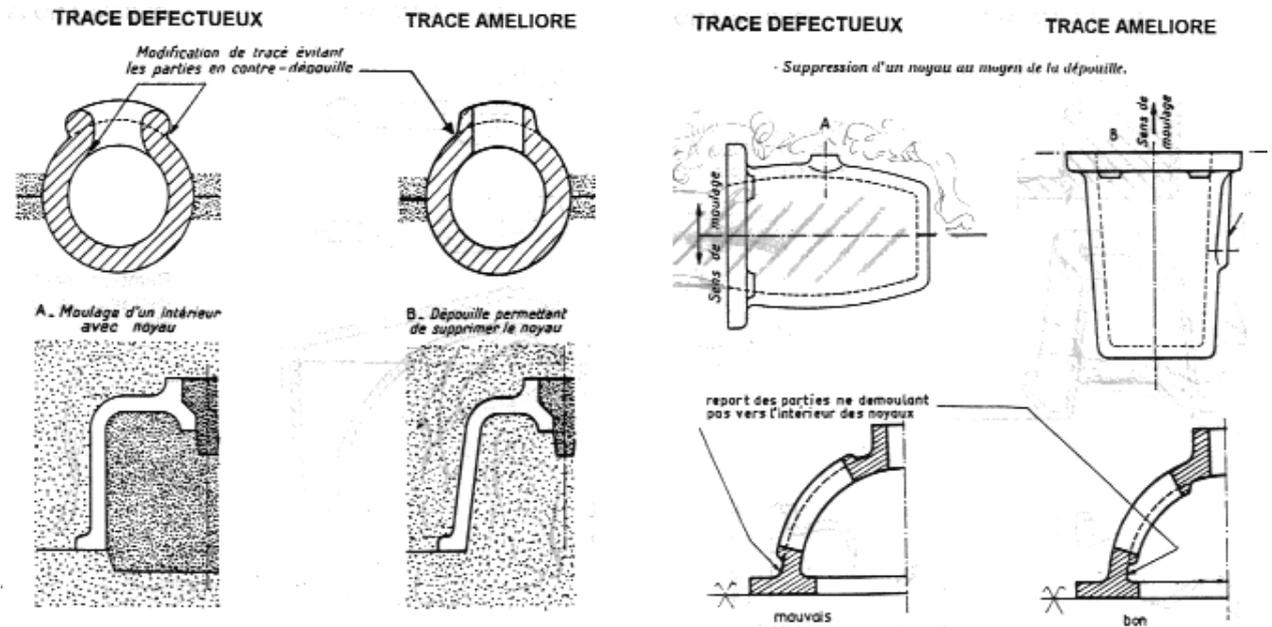
Le but est de faciliter toutes les opérations et de minimiser leur nombre.

Avant la coulée

Faciliter le moulage au niveau du moule, des noyaux et des modèles, afin de diminuer le nombre de châssis et d'opérations.



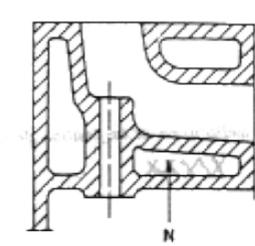
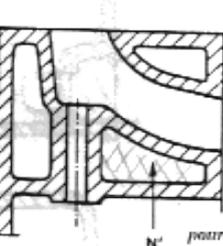
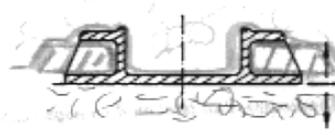
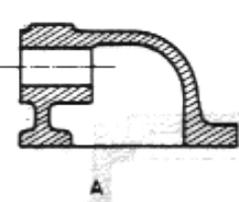
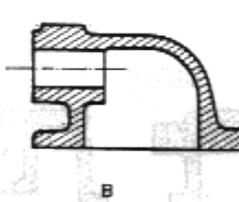
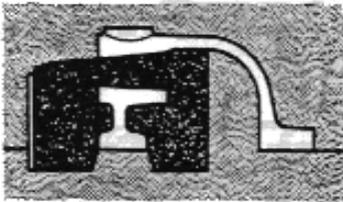
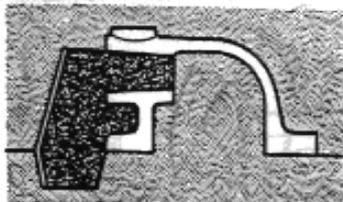
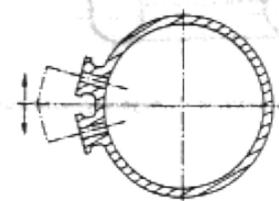
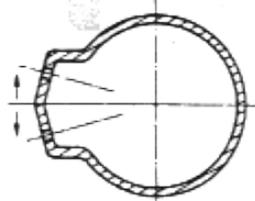
Adopter des formes de pièces se démoulant sans artifice suivant une direction perpendiculaire au plan de joint, afin de faciliter le démoulage du modèle.



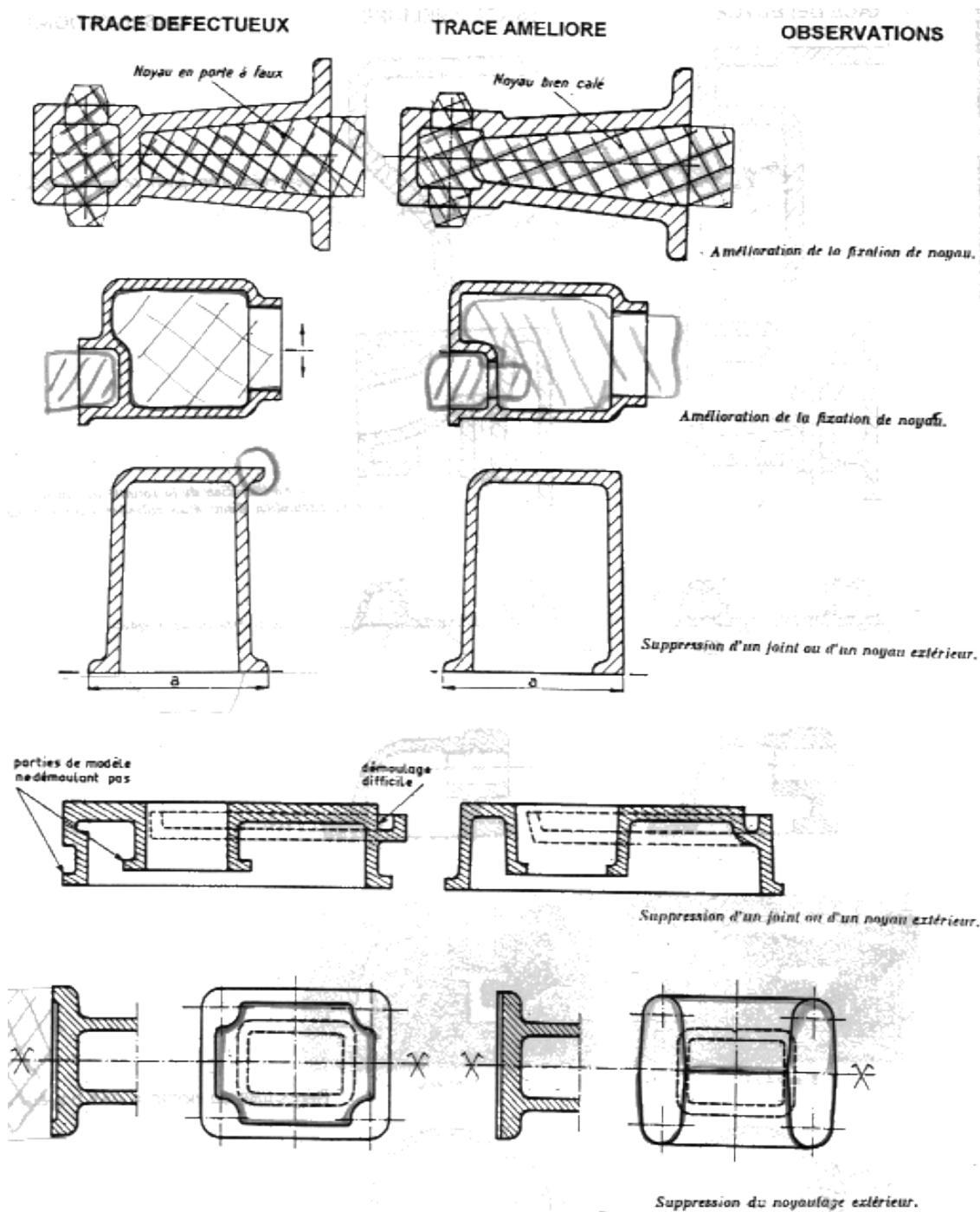
Rechercher des formes symétriques de pièces, afin de ne fabriquer qu'une partie du modèle ou des boîtes à noyaux.

Rechercher des formes de pièces réalisées avec un nombre d'éléments géométriques simples, afin d'assurer une précision dimensionnelle de forme et de position améliorée.

Limiter le nombre de noyaux. En effet, le sable à noyau est plus coûteux que celui de l'empreinte. De plus, la réalisation des noyaux nécessite plus d'opérations.

TRACE DEFECTUEUX	TRACE AMELIORE	OBSERVATIONS
 <p>Partie de noyau fragile</p>		<p>Suppression d'une partie de noyau fragile.</p>
 <p>N</p>	 <p>N'</p>	<p>Amélioration de la solidité du noyau pour la circulation d'eau d'un cylindre d'automobile.</p>
		<p>Suppression de noyaux.</p>
 <p>A</p>	 <p>B</p>	
 <p>2 noyaux</p>	 <p>1 noyau</p>	<p>Réduction du nombre des noyaux.</p>
		<p>Suppression du noyautage extérieur.</p>

Prévoir un positionnement facile, stable et précis des noyaux dans le moule, afin de penser au remoulage avec des noyaux dans l'empreinte inférieure.



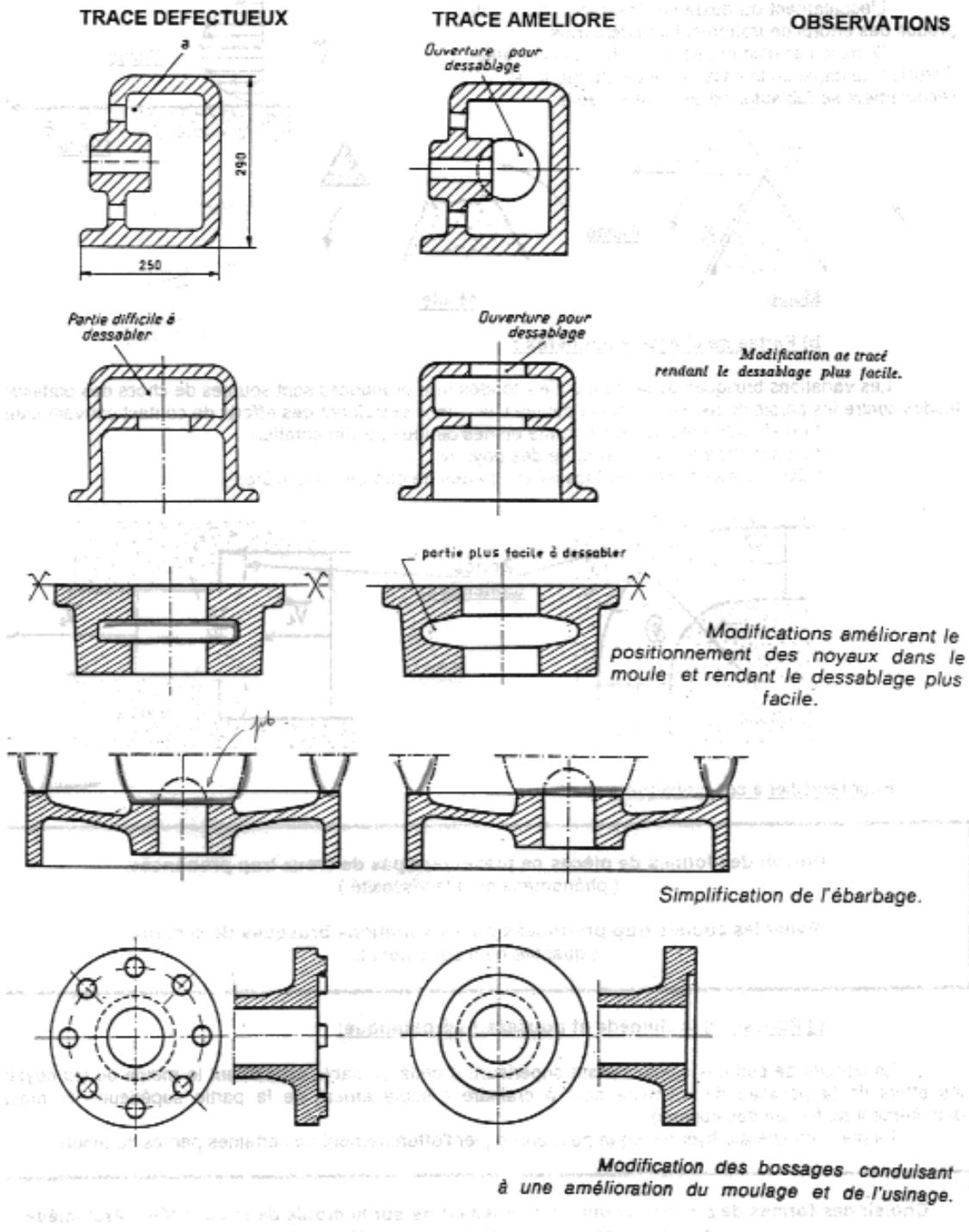
Éviter la destruction de certaines parties fragiles des noyaux et des empreintes, afin de dessiner des formes de pièces conférant une certaine robustesse et rigidité des noyaux et empreintes. La durée de vie est améliorée.

Pour un moulage en sable, les noyaux sont plus simples à mouler que les empreintes. Il est donc préférable de reporter les difficultés de moulage sur le noyau.

Pour un moulage en coquille, les formes intérieures doivent se démouler normalement. Il est donc préférable de reporter les difficultés de moulage sur les formes extérieures de l'empreinte.

Après la coulée

Faciliter le désablage, l'ébarbage, l'usinage.



Rechercher des formes extérieures qui ne retiennent pas le sable après le décochage.

Prévoir des ouvertures suffisantes pour désablage et nettoyage des formes intérieures de la pièce.

Faire coïncider si possible le plan de joint avec une surface de la pièce, afin de rendre l'ébarbage plus facile et les décalages des moules moins visibles.

Mettre dans un même plan si possible les surfaces devant être usinées.

3 Phénomènes physiques mis en jeu lors du coulage des pièces

3.1 Écoulement du métal en fusion

3.1.1 Effets de la viscosité sur les parois du moule

L'écoulement de fluide sur les parois du moule produit des efforts de frottement liquide/parois.

Dans le cas d'un moule en sable, ceci entraîne l'érosion du canal ou la cassure locale du moule si l'écoulement se fait autour d'une partie fragile.

3.1.2 Perte de charges singulières

Les variations brusques de section ou les coudes trop prononcés sont sources de chocs des particules fluides contre les parois du moule lors de la coulée. Ces chocs entraînent des efforts de contact pouvant créer :

- un effondrement local du moule ou des conduits d'alimentation ;
- un déboîtement ou la rupture des noyaux ;
- des chutes de pression localisées (pertes de charges singulières).

Pour remédier à ces problèmes :

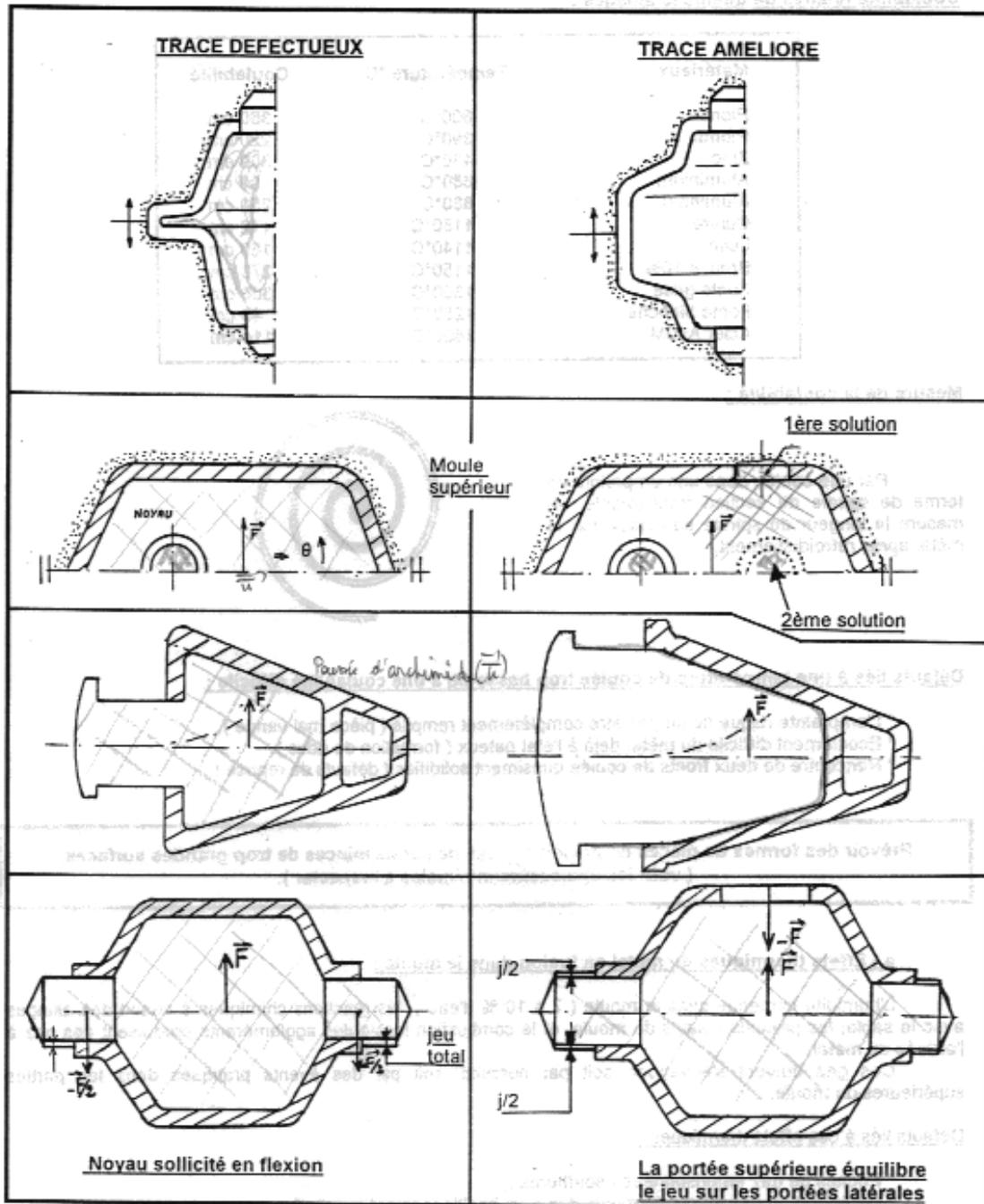
- prévoir des formes de pièces ne présentant pas de creux trop prononcés (phénomène dû à la viscosité) ;
- éviter les coudes trop prononcés où les variations brusques de section (quantité de mouvement).

3.1.3 Poussée d'Archimède et poussée hydrostatique

La densité de certains alliages étant supérieure à celle du sable constituant le moule ou les noyaux, les effets de la poussée d'Archimède sont à craindre (soulèvement de la partie supérieure du moule, déboîtement ou flexion des noyaux).

La pression latérale hydrostatique peut provoquer l'effondrement de certaines parties du moule.

Choisir des formes de pièces qui minimisent les effets sur le moule de la poussée d'Archimède et de la pression hydrostatique du métal en fusion.



3.1.4 Remplissage de l'empreinte : la coulabilité

C'est l'aptitude du métal en fusion à remplir les cavités de l'empreinte.

La coulabilité est liée à la viscosité du métal qui, elle même, dépend de la température.

Lorsque le métal avance dans le moule, il se refroidit au contact des parois, sa viscosité augmente jusqu'au moment où sa propagation dans l'empreinte est stoppée par les forces de viscosité (formation d'un bouchon).

La coulabilité dépend donc de la température de coulée et de la nature du métal ou de l'alliage (conductivité thermique, viscosité).

Mesure de la coulabilité

Par une coulée dans l'empreinte en forme de spirale de section trapézoïdale, on mesure la longueur de spirale parcourue par le métal après refroidissement.

Coulabilité relative de quelques alliages

Matériaux	Température	Coulabilité
Plomb	800°C	360 cm
Plomb	390°C	220 cm
Zinc	480°C	300 cm
Aluminium	680°C	90 cm
Aluminium	880°C	250 cm
Cuivre	1150°C	172 cm
Laiton	1140°C	189 cm
Bronze (16%)	1150°C	276 cm
Fonte grise	1300°C	300 cm
Fonte blanche	1250°C	43 cm

Défauts liés à une température de coulée trop basse ou à une coulabilité difficile

- L'empreinte risque de ne pas être complètement remplie (pièce mal venue).
- L'écoulement difficile du métal déjà à l'état pâteux (formation de rides).
- La rencontre des deux fronts de coulée quasiment solidifiés (défauts de reprise).

Il faut donc prévoir des formes de pièces ne présentant pas de parois minces de trop grandes surfaces (voir les épaisseurs minimales à respecter).

3.1.5 Effets thermiques du métal en fusion dans le moule

L'humidité contenue dans le moule (7 à 10% d'eau), les réactions chimiques à chaud des alliages avec le sable avec les produits volatils du moule, et la combustion locale des agglomérats produisent les gaz à l'arrivée du métal.

Ces gaz doivent s'échapper soit par porosité, soit par des événements pratiqués dans les parties du moule.

Défauts liés à ces effets thermiques :

- poches de gaz emprisonnées (soufflures) ;
- détérioration des parois du moule due à un bouillonnement excessif ;
- partie de l'empreinte non remplie par suite d'une importante poche de gaz n'ayant pu s'évacuer, c'est un « refus » prévoir des événements.

Prévoir des formes de pièces permettant l'élimination naturelle des gaz, des grains de sable et des impuretés (par gravité, par courant).

3.2 La solidification

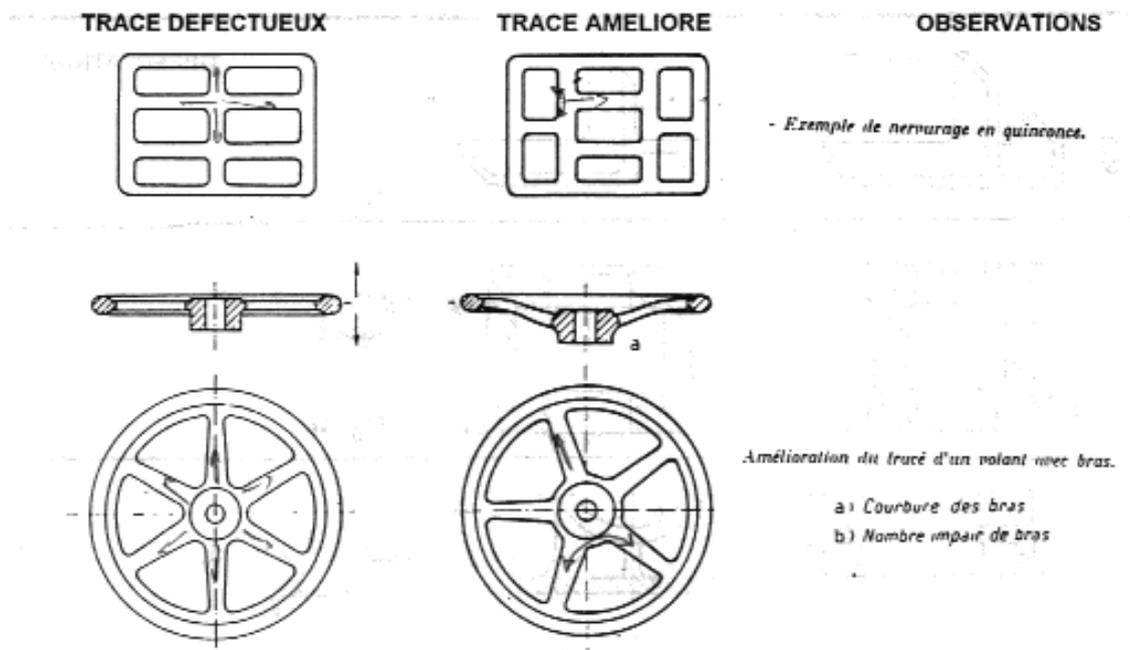
Le retrait

Le métal se contracte pendant son refroidissement lorsqu'il se trouve sous ses trois phases : liquide, liquide+solide, solide.

C'est pendant la phase intermédiaire que le retrait est le plus important.

Les échanges de chaleur se font avec les parois du moule. Le gradient de température est donc perpendiculaire aux surfaces de l'empreinte en leur voisinage.

Les isothermes orthogonales au gradient thermique sont donc quasiment parallèles aux parois du moule sauf au niveau des angles où le flux thermique dépend de la valeur de ceux-ci.



Étude du refroidissement

Le métal se contracte par abaissement de la température. Les parties froides créent un appel de métal pendant la solidification. On observe un flux de métal liquide à travers les surfaces isothermes. Ce métal liquide provient de la partie centrale, plus chaude et se dirige vers les parties externes plus froides. On assiste donc à la formation d'une cavité dans la partie supérieure du lingot appelé **retassure**. Le retrait peut être réduit en abaissant la température de coulée mais, dans ce cas, la coulabilité diminue.

Le même phénomène se produit pendant la phase de solidification, si une partie massive du métal se solidifie sans être alimentée en permanence en liquide, il se produit une **retassure interne**.

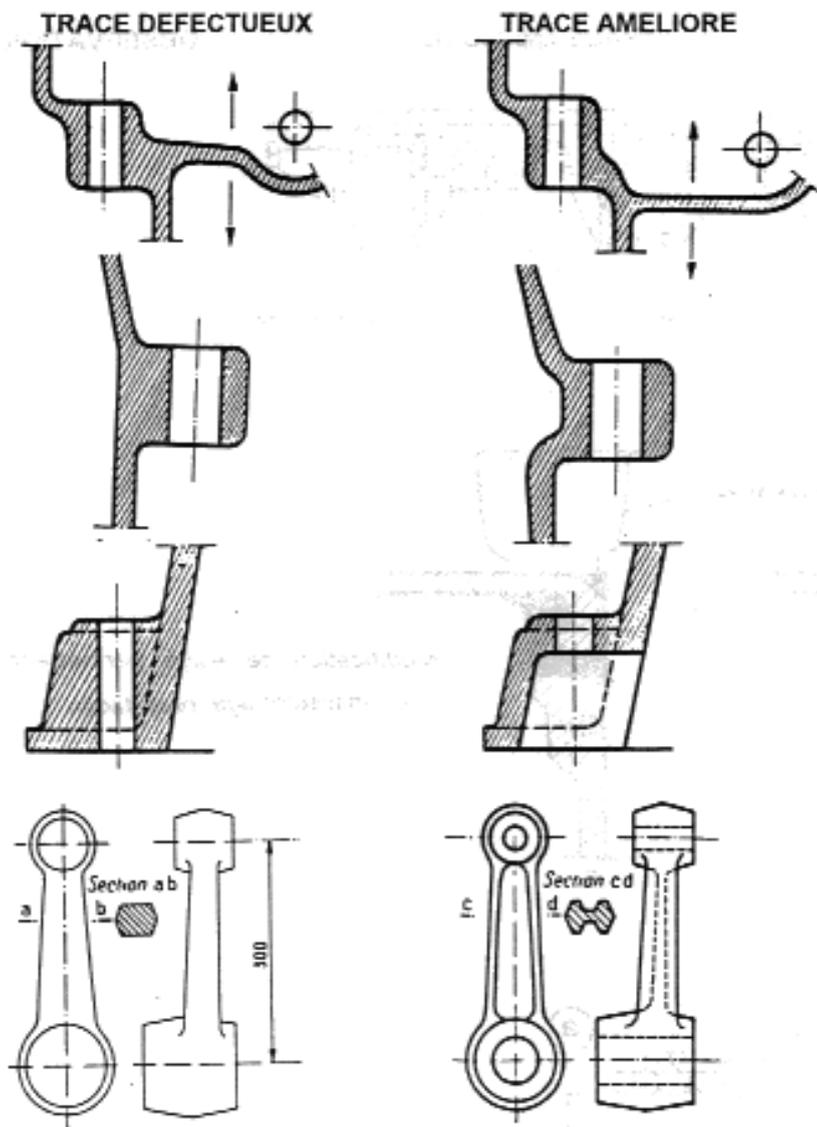
La masselotte est un appendice de la pièce moulée, enlevé après démoulage. Son but est de nourrir en métal liquide les parties qui se solidifient en dernier. Les masselottes peuvent également servir de trou de coulée ou d'évent (évacuation des gaz et des impuretés). Elles peuvent être internes ou externes.

Lorsque la partie massive isolée n'est pas très importante, on observe une multitude de retassures microscopiques que l'on appelle **porosités**.

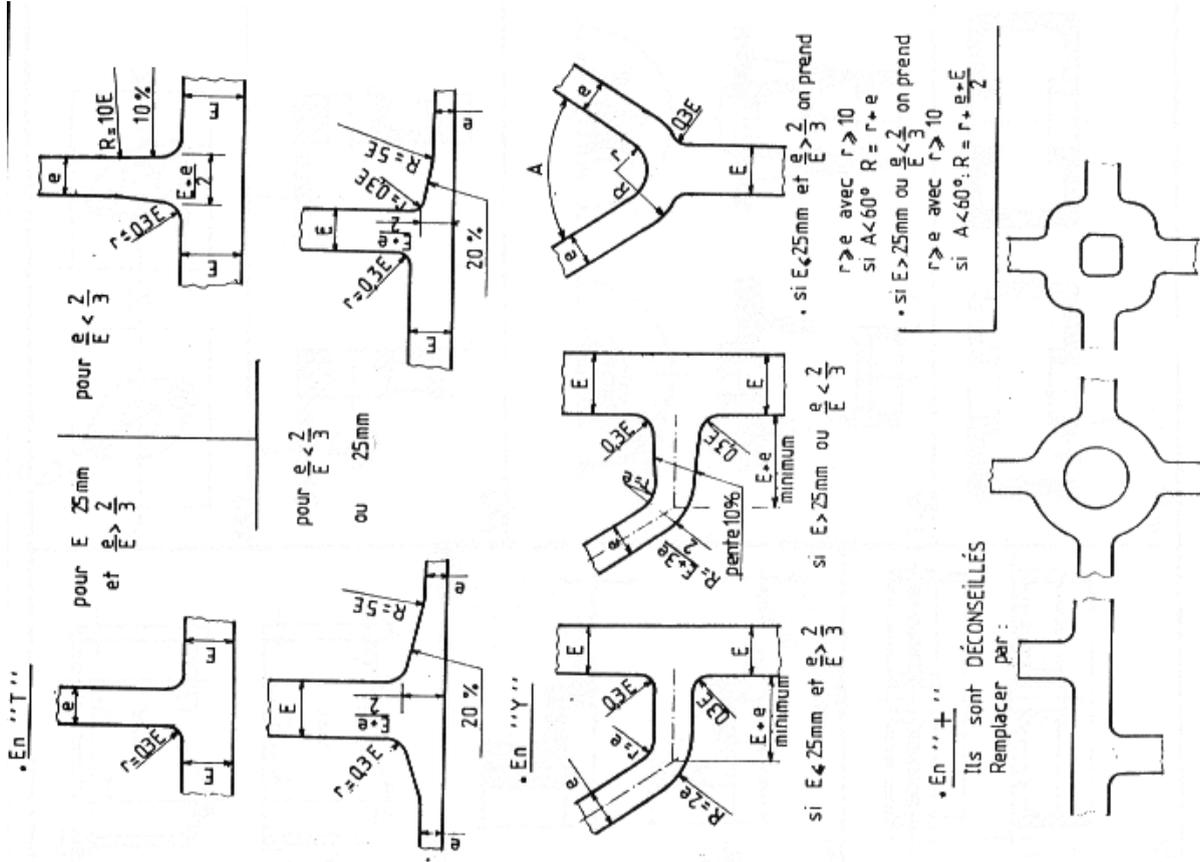
Si on peut traiter le problème à la conception de la pièce, le mouleur peut y remédier par des masselottes ou des refroidisseurs.

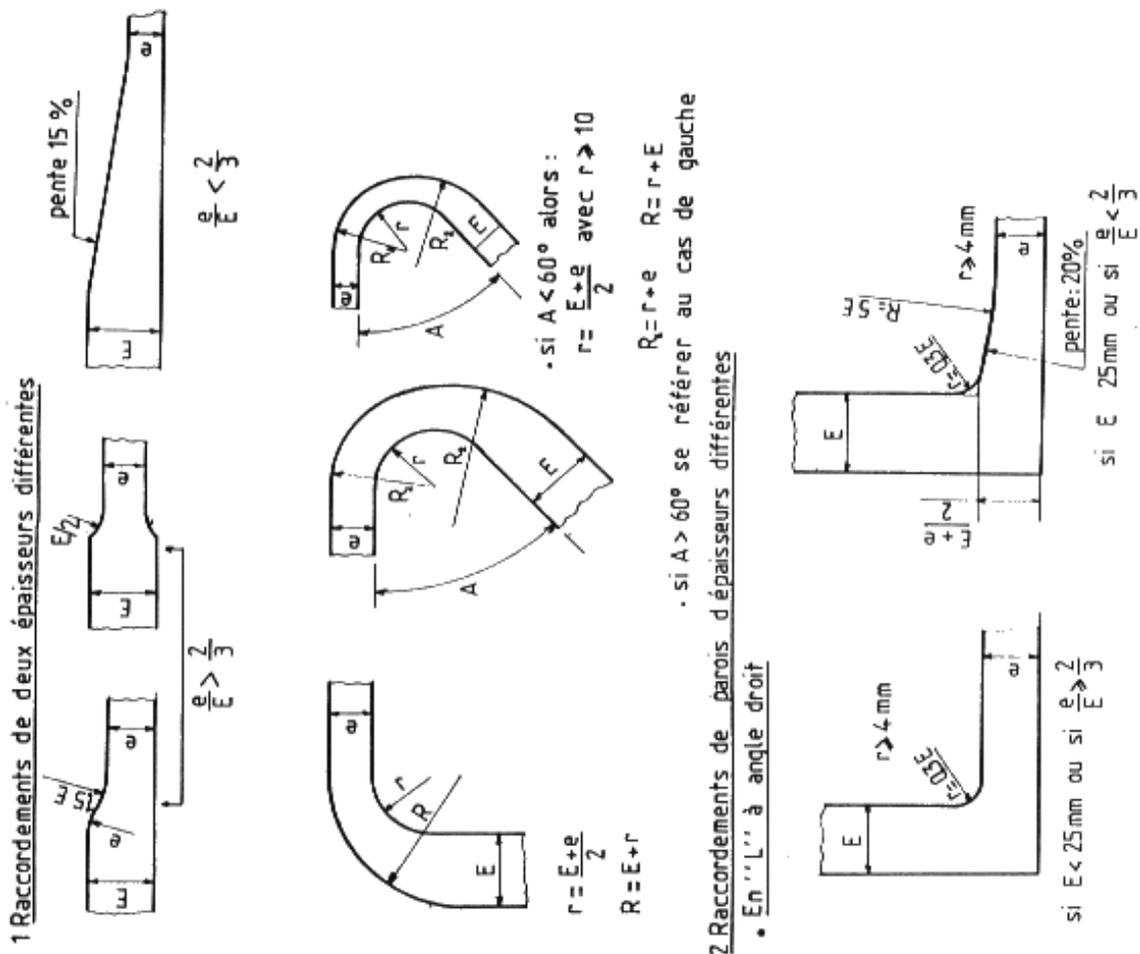
Pour éviter les retassures et les porosités

Éviter les parties massives isolées.



Respecter les règles de raccordement des parois.





Donner les formes permettant une alimentation naturelle en métal liquide (prévoir une solidification dirigée).

Épaisseurs constantes et progressives. Pas d'angles vifs.

Solidification dirigée

Le moule étant rempli, le front de solidification progresse depuis les parties les moins épaisses et se dirige vers les plus épaisses. Le courant de métal qui alimente les zones de solidification est l'inverse du sens de déplacement du front ci-dessus.

Pour éviter la formation du bouchon, il faut une augmentation progressive de l'épaisseur de la pièce, la partie la plus massive étant reliée à une masselotte permettant de compenser les carences en métal liquide causées par le retrait.

3.2.1 Retrait phase solide

Retrait à haute température

Lorsque le rayon de raccordement de deux parois est trop petit, la résistance à chaud du métal solidifié au voisinage de cet arrondi n'est pas suffisante à cause de la mauvaise évacuation de la chaleur, il se produit alors une

crique.

Exemple :

- mauvaise évacuation de la chaleur en A
- isothermes serrées, la résistance à chaud du métal est inférieure dans la zone entourée.
- rupture sous les efforts de F et F' engendrés par le retrait, formation d'une crique.

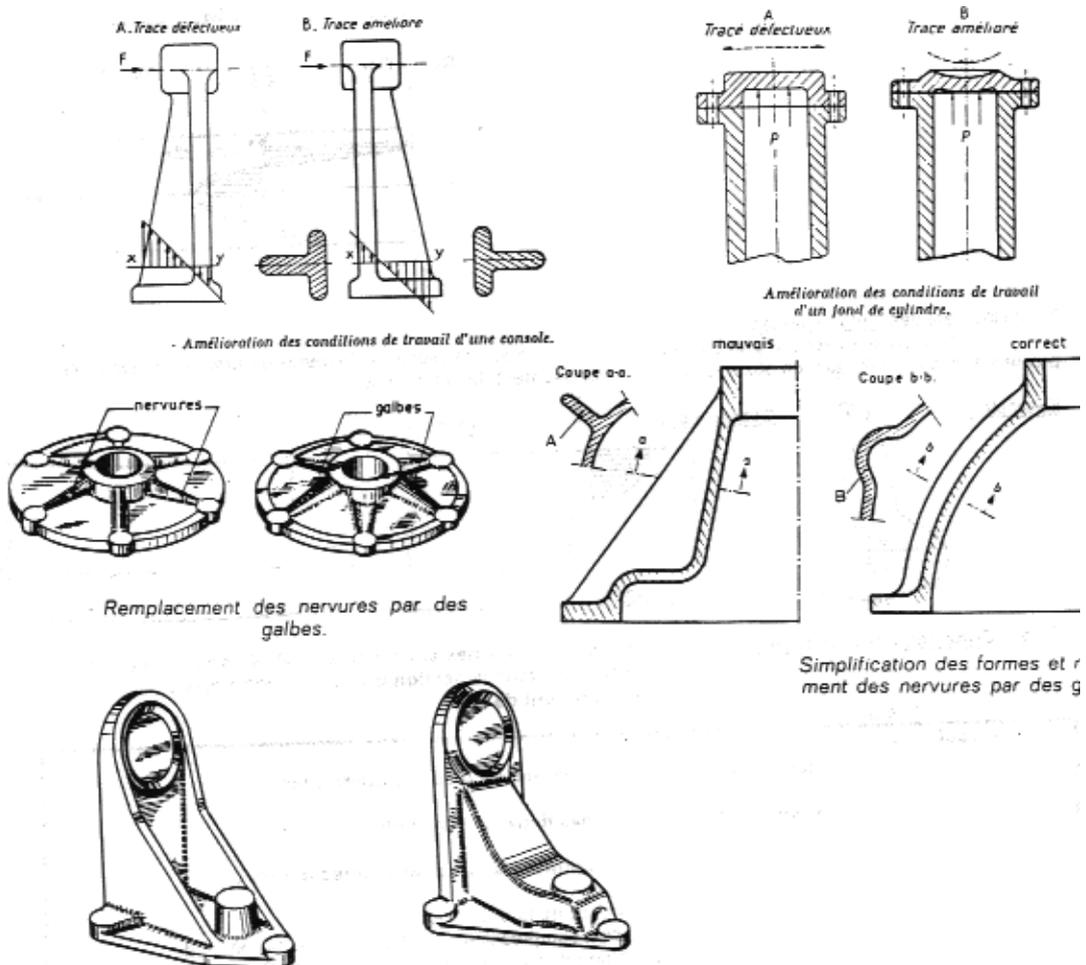
Respecter les règles de raccordement citées précédemment, ces derniers tiennent compte du flux thermique au voisinage des arrondis intérieurs et évitent en général la formation de criques (les isothermes sont à peu près parallèles).

Étudier la forme de la pièce de manière à ce que les forces engendrées par le retrait à haute température en phase solide ne sollicitent pas une zone trop faible de la pièce.

3.3 Lois de la résistance des matériaux

Les lois de la résistance des matériaux permettent au concepteur de déterminer les formes et les dimensions de la pièce nécessaires à un bon fonctionnement de celle-ci.

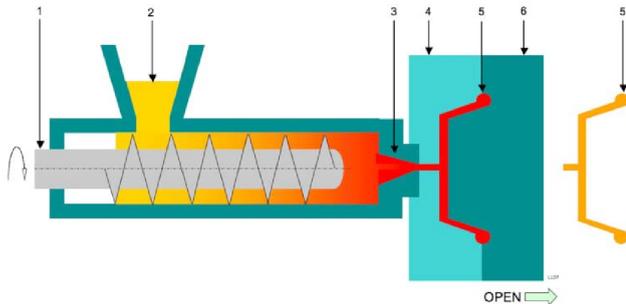
Exemple : il faut veiller à ce que les sections les plus fortes soient sollicitées en traction et les sections les plus minces en compression.



4 L'injection plastique

Vous trouverez ici des informations sur l'injection plastique. Ces informations sont données à titre indicatif.

L'injection des polymères permet d'obtenir en une seule opération des pièces finies, de formes complexes, dans une gamme de poids de quelques grammes à plusieurs kilogrammes.



1. Vis de plastification contrôlée par la presse
2. Trémie d'alimentation
3. Buse d'injection
4. Partie fixe du moule
5. Empreinte/pièce
6. Partie Mobile du moule

1+2+3 = Cylindre de plastification

Les fonctions du système de plastification et d'injection consistent à fondre la matière plastique et à l'injecter dans le moule.

La presse est là pour contrôler la vitesse et la pression d'injection de la matière dans le moule.

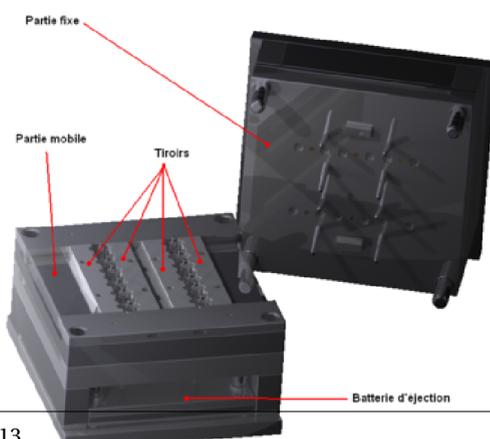
Contrairement au moulage de pièces métalliques, le temps de cycle pour fabriquer une pièce en injection, dépasse rarement la minute, de plus le moule est constamment régulé par un circuit de refroidissement.

Tout d'abord, l'empreinte du moule est remplie en moins d'une seconde pour les petites pièces (touches de téléphones portables, presse étoupe...) et en quelques secondes pour les pièces de plus gros volumes (dossier de chaise, pare-chocs de voiture, pièces de carrosserie...).

Ensuite vient la phase de maintien ou de compactage durant laquelle la presse met l'empreinte sous pression en injectant plus de matières afin de combler le retrait du plastique.

Pour finir les pièces sont extraites par un kit d'éjection.

4.1 L'outillage



Moule à 4 tiroirs

L'outillage ou moule, est en général constitué d'une partie fixe fixée sur la presse, d'une partie mobile qui va se déplacer pour pouvoir libérer la pièce une fois refroidie et d'un système d'éjection chargé de pousser la pièce en dehors du moule.

Un moule, doit remplir plusieurs fonctions :

- fonction mise en forme
- fonction alimentation
- fonction régulation
- fonction refroidissement de la pièce
- fonction éjection

4.1.1 Fonction mise en forme ou empreinte

Dans un moule d'injection le nombre d'empreintes est généralement un nombre pair (en dehors des moules mono empreinte) ceci est fait pour des raisons d'équilibrage de remplissage. Le choix du nombre dépend essentiellement de la quantité à produire à fin de vie du moule.

La forme de la pièce se fait par l'empreinte qui se répartit entre les deux parties (fixe et mobile) du moule et d'autres éléments auxiliaires tel que (tiroirs -cales montantes- noyaux) dans le but de faire des formes en contre dépouilles (des formes qui ne se démoulent pas dans le même axe d'ouverture du moule)

4.1.2 Fonction alimentation

La fonction alimentation a pour but de transférer la matière plastifiée du fourreau de la presse, vers l'empreinte du moule. Au cours de ce cheminement, la matière est soumise à différentes contraintes en passant par :

- La buse d'injection,
- Le reçu de buse du moule
- Les canaux d'alimentations
- Les points d'injection
- Les formes de la pièce

Il existe deux grands types de canaux d'alimentation :

- Les canaux d'alimentations standards : Ils sont placés directement dans la plaque du moule et doivent être démoulés comme la pièce après chaque injection. La matière utilisée pour les canaux à chaque injection est perdue.
- Alimentation sans déchets ou canaux chauds : Ils doivent conduire la matière moulée dans l'empreinte sans déperdition de chaleur. Ils sont chauffés séparément de l'outillage (entre $180^{\circ}C$ et $300^{\circ}C$ suivant la matière injectée). Techniquement il faut donc isoler le canal du reste de l'outillage dont la température est nettement inférieure. La matière du canal n'est pas perdue.

4.1.3 Fonction régulation

La régulation de la température de l'outillage se fait à travers un liquide caloporteur qui peut être :

1. l'eau pour des températures faibles (eau à $15^{\circ}C$)
2. l'huile pour des températures allant à $130^{\circ}C$

Ce liquide est envoyé à travers des canaux percés dans la carcasse de l'outillage et les empreintes en utilisant un thermorégulateur.

4.1.4 Fonction éjection

La plupart des pièces réalisées par injection plastique resteraient dans le moule après son ouverture et ne seraient pas évacuées sous l'effet de la gravité seule si aucun système d'éjection n'existait. Plusieurs systèmes ont donc été conçus afin d'aider l'extraction de la pièce à l'ouverture du moule :

4.1.4.1 Les éjecteurs

Les éjecteurs sont des barres métalliques cylindriques pleines (parfois creuses) qui, lors de l'ouverture du moule, viennent pousser la pièce plastique pour l'extraire du moule. Il s'agit de la technique d'éjection la plus utilisée car elle peut s'appliquer à quasiment toutes les pièces plastiques. Les traces des éjecteurs sont souvent visibles sur la pièce et sont considérées comme "inesthétiques". Les concepteurs de pièces injectées s'arrangent alors pour que ces traces d'éjecteurs se situent sur la partie cachée de la pièce plastique lors de son utilisation.

4.1.4.2 Les plaques dévêtisseuses

La fonction de la plaque dévêtisseuses est la même que celle des éjecteurs. Il s'agit d'une plaque qui va venir pousser sur les bords d'une pièce. Ces bords doivent donc se situer dans un même plan. L'avantage principal d'une plaque dévêtisseuses est le fait qu'aucune marque n'est réellement visible sur la pièce finie.

4.2 Conception des pièces injectées

La conception de pièces injectées est un métier qui consiste à adapter une pièce afin de faciliter sa fabrication par injection plastique. « L'art » de concevoir une pièce injectée consiste à concevoir une pièce respectant toutes les contraintes exigées par la technique d'injection, tout en respectant le cahier des charges.

4.2.1 Les contraintes de conception

Des règles de conception pour les pièces injectées ont été définies grâce à l'expérience industrielle dans le domaine soit : l'éjection de l'air poussé par le plastique pendant l'injection, la diffusion égale du plastique dans le moule, la position des poussoirs qui éjecte la ou les pièce(s) finis, les pièces mobiles dans le moule, etc.

4.2.1.1 Les dépouilles

Afin de faciliter l'extraction de la pièce à l'ouverture du moule, ou afin de ne pas arracher de la matière lors de l'extraction de la pièce, aucune face de la pièce injectée ne doit être strictement perpendiculaire au plan de joint du moule (autrement dit, aucune face ne doit être strictement parallèle à la direction d'ouverture du moule). Si ce n'est pas le cas, on dit de cette face qu'elle n'est pas dépouillée. Exceptionnellement, et pour des raisons fonctionnelles, des exceptions peuvent survenir et certaines faces peuvent ne pas être dépouillées. La surface de ses faces doit alors être la plus petite possible.

Afin de pouvoir démouler la pièce, aucune face ne doit comporter de dépouille négative. Une dépouille positive minimum est souvent citée, valant 2 degrés.

Lors de dépouille négative, on parle alors de contre-dépouille. Celles-ci ont besoin d'un système adapté pour pouvoir permettre l'éjection de la pièce (cale-montante ou tiroir).

4.2.1.2 Les épaisseurs constantes

Pour éviter de nombreux défauts, il est conseillé d'avoir des épaisseurs constantes. Cela permet une bonne homogénéité de la matière et limite la présence de retassures ou de vacuoles.

De plus en injectant des pièces d'épaisseurs fines, il est possible de se dispenser d'astuces telles que les masselottes qui sont difficiles à gérer (taille, position, efficacité...)

4.2.1.3 Le nervurage

Comme nous l'avons vu précédemment, il est conseillé d'avoir de fines épaisseurs de pièces. Malheureusement, dans certain cas, les pièces moulées subissent des contraintes importantes pouvant entraîner leurs ruptures. Pour pallier ce problème, il faut renforcer la pièce tout en gardant de faibles épaisseurs. Le seul moyen à notre disposition est de mettre des nervures (généralement un triangle rectangle isocèle d'épaisseur de la pièce). La forme des nervures ne gêne pas le moulage et démoulage (angle de dépouille) et la pièce est renforcée

4.3 Défauts des pièces injectées

4.3.1 Retassures

Description : Les retassures sont dans leur grosse majorité des défauts de surface caractérisés par un affaissement de la matière, parmi elles :

- les retassures localisées : au voisinage de zones avec fortes variations d'épaisseurs (nervures)
- les retassures en osselets : le retrait de matière s'effectue sur une grande surface, de façon à se détacher de la paroi par pellicules (sauf sur les bords).

Mécanismes de formation : Après le remplissage de l'empreinte, la matière chaude se rétracte (le retrait dépend de la matrice polymère utilisée, et des charges présentes : PA6GF30 retrait de 0,1% en sortie de moule). La pression de maintien appliquée pour compenser ce retrait ne joue pas son rôle. Causes possibles :

- la pression de maintien est insuffisante, ce qui rend possible un retrait de la matière
- la vitesse d'injection est trop rapide, ce qui rend difficile le remplissage et rend inefficace le maintien
- la matière est déjà solidifiée au niveau du seuil ce qui entraîne des difficultés pour le maintien
- les paramètres choisis accentuent le retrait

Actions correctives :

- renforcer la pression de maintien
- baisser la vitesse d'injection et augmenter la température de la matière pour faciliter le remplissage.
- améliorer la conception du moule (éviter les variations d'épaisseurs des pièces, placement du seuil d'injection)
- augmenter la température du moule et diminuer la température de la matière (homogène)

4.3.2 Jet libre

Mécanismes de formation : La matière sort du seuil d'injection à la façon d'un jet d'eau à la sortie d'un tuyau d'arrosage. Le remplissage de l'empreinte se fait en mode turbulent, avec une décompression brutale en sortie de seuil.

Causes possibles :

- mauvaise conception du moule : seuil d'injection mal positionné (ou mal dimensionné)
 - matière trop visqueuse
 - pression au niveau de seuil trop importante
- Actions correctives :
- améliorer la conception du moule (augmenter la section du seuil)
 - augmenter la température de la matière
 - injection lente au début, puis plus rapide

4.3.3 Défauts en ligne de soudure

Description :

- ligne de soudure marquée
 - mauvaise résistance mécanique des lignes de soudure
 - stries de couleur
 - forte retassure le long de la ligne de soudure
- Mécanismes de formation :
- apparaît en fin de remplissage, la surpression dépasse la pression de maintien
 - la jonction est facilement cassable
 - dégradation de la coloration due à la température
- Causes possibles :
- mauvaise pression d'injection
 - température trop basse de la matière injectée
 - dégradation de la matière due à une surchauffe
- Actions correctives :
- augmenter la température de la matière
 - augmenter la vitesse d'injection
 - augmenter la température du moule
 - diminuer le trajet d'écoulement de la matière

4.3.4 Cernes et sillons

Description :

- les cernes, ou effet fleur sont des sillons concentriques mats autour du seuil d'injection.
- les sillons, ou effets slick-slip sont concentriques et plus ou moins creusés autour du seuil d'injection, ou dans les zones de faible épaisseur.

Mécanisme de formation : Le flux de matière pulse dans le moule, car il avance trop lentement. Le défaut est en général plus courant dans les matières amorphes, plus visqueuses à chaud.

Causes possibles :

- mauvaise introduction de la matière injectée
- mauvaise température de la matière

- mauvaise conception du moule

Actions correctives :

- augmenter les vitesses d'injection
- adapter les flux de matière (remplissage régulier)
- augmenter la température de la matière
- augmenter la température de l'outillage
- augmenter l'épaisseur des pièces

4.3.5 Entraînement d'air

Causes possible : L'air inclus peut provenir :

- d'une mauvaise plastification lors du dosage
- d'une mauvaise conception du moule (aspérités, rayures, renforcements...)

Action correctives :

- vérifier la qualité de la vis, choisir une unité de plastification adapté au volume de la matière
- augmenter la contre pression de la vis lors du dosage (freiner le recul de la vis)
- limiter la phase de décompression de la matière après dosage (diminuer la course de décompression)
- améliorer la conception du moule permettant l'évacuation de l'air
- Utiliser un équipement de « sous-vide / vacuum » afin d'extraire l'air /gaz présents dans le moule avant l'injection.

4.3.6 Sous-dosage – surdosage

Description des défauts engendrés et mécanisme de formation :

- en cas de sous-dosage le pièce obtenue est incomplète
- pour un surdosage, l'excès de matière se traduira par des bavures (pouvant boucher jusqu'aux éjecteurs), un sur-compactage (contraintes internes, cassures, déformations.

Causes possibles :

- quantité de matière injectée insuffisante ou trop importante
 - matelas de matière instable ou nul
 - clapet anti-retour de la vis de plastification usé ou cassé
- Action correctives :
- diminuer ou augmenter le dosage de matière
 - vérifier que le matelas de matière en fin d'injection est constant
 - changer le clapet anti-retour de la vis de plastification

4.3.7 Bulles – effets fontaine

Mécanisme de formation : Surtout pour les pièces de forte épaisseur, le remplissage se fait par couches successives. La matière solidifiée en dernier se trouve à cœur, donc il peut y avoir formation de bulles (et être assimilées à des retassures)

Action correctives :

- augmenter la vitesse d'injection

4.3.8 Défauts dimensionnels

Actions correctives : Pour des précisions dimensionnelles fines (micron), il faut :

- une régulation en température précise du moule
- un moule très rigide
- éviter les contraintes internes
- une bonne prévision du retrait
- surface de l'empreinte de grande qualité (rayure, corrosion, abrasion...

4.3.9 Incorporation d'éléments étranger – mauvais mélange

Description des défauts :

- délamination (perte de lamelles) ou exfolions (pellicules)
- marbrures mauvaise homogénéisation des couleurs)
- présence de corps métalliques : signe d'une détérioration de la vis/outillages.

Causes possibles :

- alimentation matière polluée (poussière, métal)
- outillage dégradé
- mauvaise plastification

Actions correctives :

- incorporer une grille magnétique à la trémie
- éviter les mélanges
- adapter les paramètres de plastification à la matière

4.4 Problèmes de démoulage

4.4.1 Marquage des éjecteurs

- Déformations
- Les éjecteurs transpercent la pièce au moment de l'éjection

Causes possibles :

- température matière trop importante au moment de l'éjection
- pression interne trop élevée
- mauvaise taille/disposition des éjecteurs

Actions correctives :

- augmenter le temps de refroidissement
- adapter le profil des vitesses d'injection
- adapter la vitesse des éjecteurs
- baisser la température du moule
- vérifier que les éjecteurs soit correctement montés

4.4.2 La pièce reste coincée dans le moule – dégradation mécanique de la pièce

Description : Dégradations irréversibles :

- cassures
- rainures
- fissures

Causes possibles / correction :

- pression interne trop élevée
- la pièce reste coincée sur ses parois externes : l'éjection est trop précoce
- la pièce reste coincée sur ses parois internes : l'éjection est trop tardive

4.4.3 Tirage de fil

Un long fil de matière sort de la buse jusque vers la carotte, ce qui gêne l'éjection (la carotte reste accrochée).

Causes possibles / correction : La matière restée dans la buse au moment de démoulage est trop chaude ou trop comprimée

Références

- [1] <http://souspression.canalblog.com/>
- [2] <http://conanec-industrie.com/realisations-moule-dinjection>
- [3] <http://www.leshommesdufutur.com/onera-projet-ultmat.html>
- [4] <http://www.sinoconcept.fr/wordpress/wp-content/uploads/2011/05/machine-rotomoulage.jpg>
- [5] http://www.seebindustrie.com/seeb-industrie-gammes-realisation.php?gamme_id=83
- [6] Supports de cours de Renan Bonnard,PTSI, Lycée Newton, Clichy la Garenne
- [7] Supports de cours de Joël Boiron, PTSI, Lycée Gustave Eiffel, Bordeaux