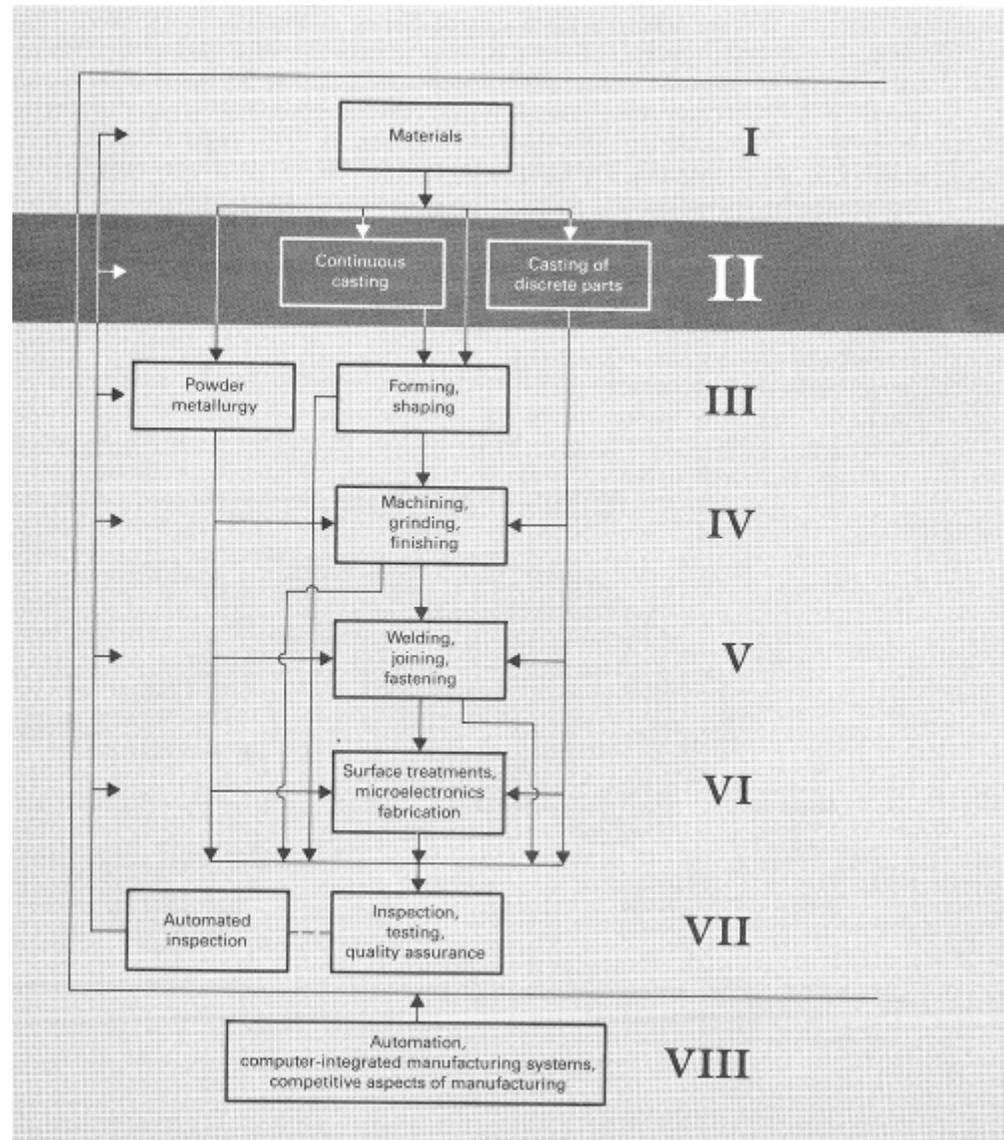
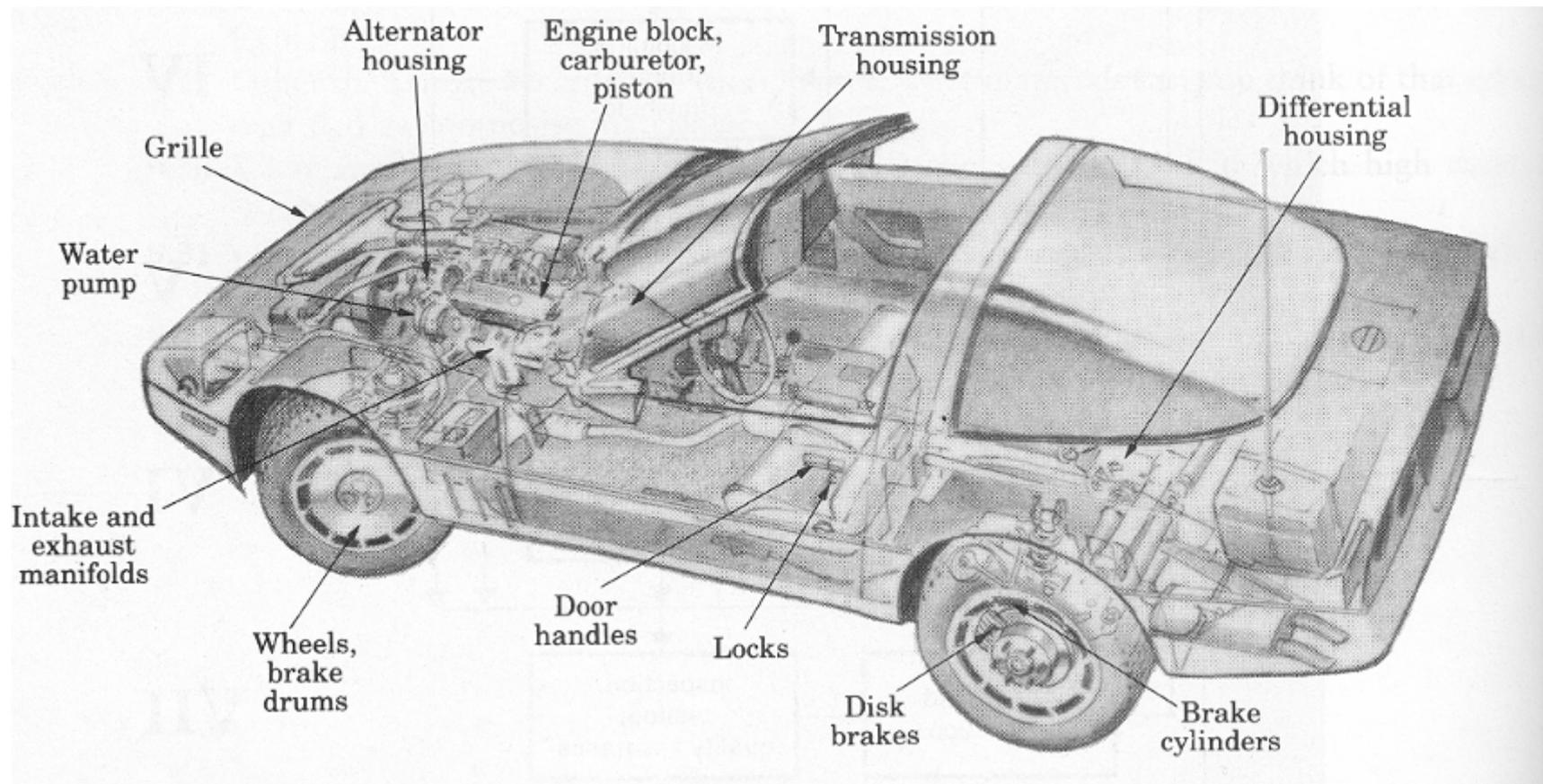


# Partie II : le moulage





Les procédés de moulage sont souvent préférés à d'autres procédés de fabrication pour les raisons suivantes :

- ils peuvent produire des formes complexes avec des cavités internes ou des sections creuses,
- ils peuvent produire de très grande pièces,
- ils peuvent utiliser des matériaux qui sont difficilement mis en oeuvre autrement
- pour des raisons économiques

# Le moulage

- principes fondamentaux du moulage
- les principaux procédés de coulée
- les principaux procédés de moulage
- règles permettant de mieux concevoir les pièces pour le moulage

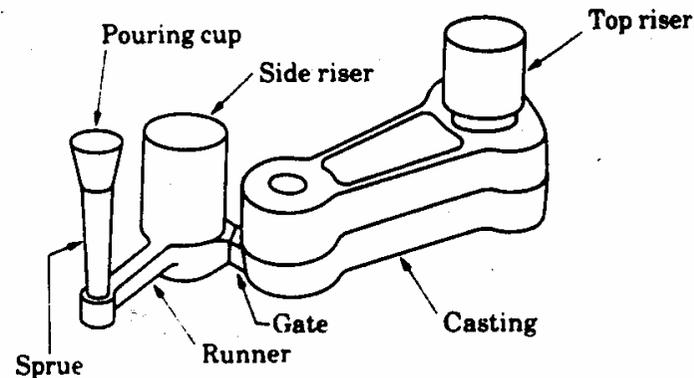
# Le moulage

- principes fondamentaux du moulage
- les principaux procédés de coulée
- les principaux procédés de moulage
- règles permettant de mieux concevoir les pièces pour le moulage

# **Facteurs principaux influençant la coulée**

- l'écoulement du métal fondu dans le moule,
- le transfert de chaleur lors de la solidification et du refroidissement du métal dans le moule,
- le processus de solidification du métal à partir de son état fondu,
- l'influence du type de matériau du moule.

# Écoulement du métal.



Par exemple, la conception du dispositif d'entrée du métal se base sur deux principes de mécanique des fluides : le théorème de Bernouilli et la loi de conservation de la masse.

# Le théorème de Bernoulli

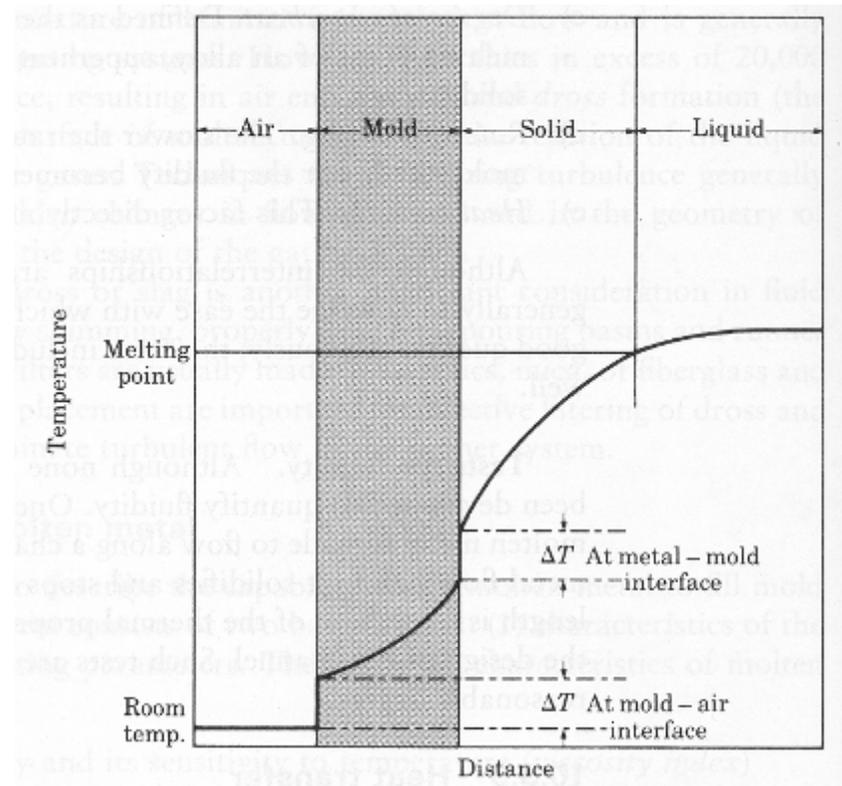
$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = cte$$

# La loi de conservation de la masse

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

**Ces deux théorèmes permettent notamment d'expliquer pourquoi les carottes de coulée doivent être de forme conique.**

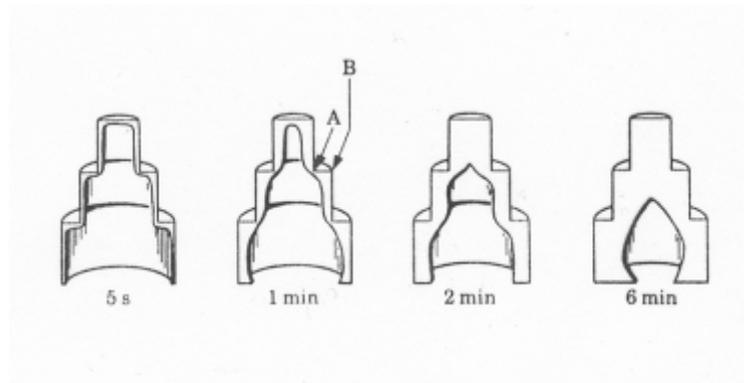
# Transfert de chaleur



# Le temps de solidification

$$\text{le temps de solidification} = C \left( \frac{\text{volume}}{\text{surface}} \right)^2$$

où C est une constante qui dépend du matériau composant le moule, des propriétés du métal et de la température.

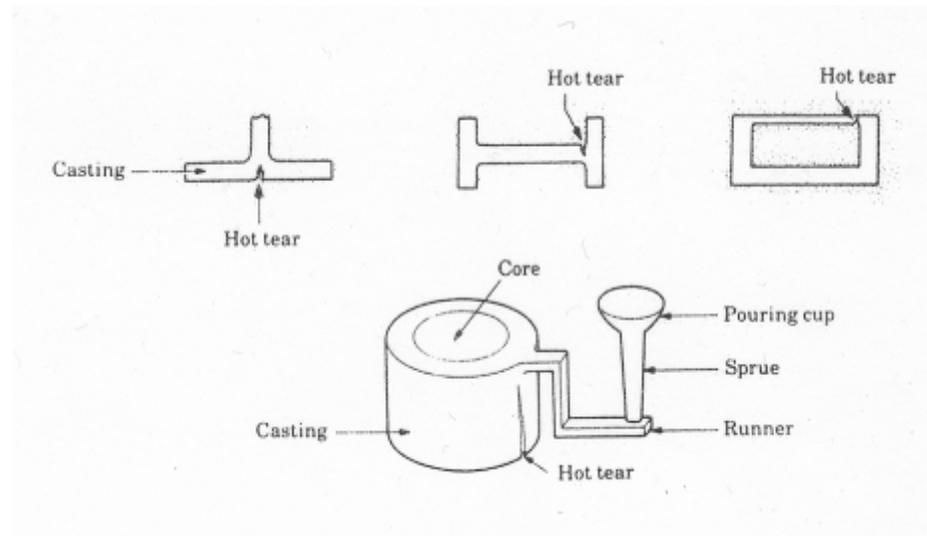


# Le retrait

SOLIDIFICATION CONTRACTION FOR VARIOUS CAST METALS

METAL OR ALLOY	VOLUMETRIC SOLIDIFICATION CONTRACTION (%)	METAL OR ALLOY	VOLUMETRIC SOLIDIFICATION CONTRACTION (%)
Aluminum	6.6	70% Cu-30% Zn	4.5
Al-4.5% Cu	6.3	90% Cu-10% Al	4
Al-12% Si	3.8	Gray iron	Expansion to 2.5
Carbon steel	2.5-3	Magnesium	4.2
1% carbon steel	4	White iron	4-5.5
Copper	4.9	Zinc	6.5

Source: After R. A. Flinn.



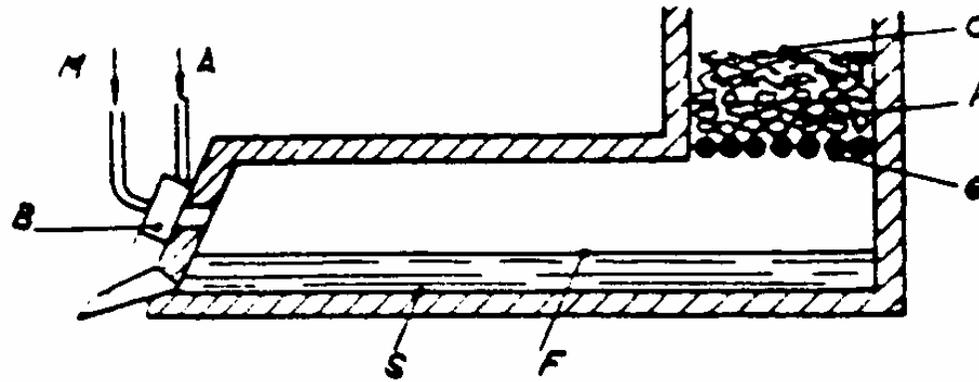
# Le moulage

- principes fondamentaux du moulage
- les principaux procédés de coulée
- les principaux procédés de moulage
- règles permettant de mieux concevoir les pièces pour le moulage

# Les procédés de coulée

- four FLAVEN
- four électrique
  - four à arc
  - four à induction
    - four à circuit magnétique fermé
    - four sans circuit magnétique fermé

# Four Flaven



- |             |                       |
|-------------|-----------------------|
| A = air     | P = paille            |
| M = fuel    | G = grille            |
| B = brûleur | S = sole ou réverbère |
| C = cuve    | F = fonte.            |

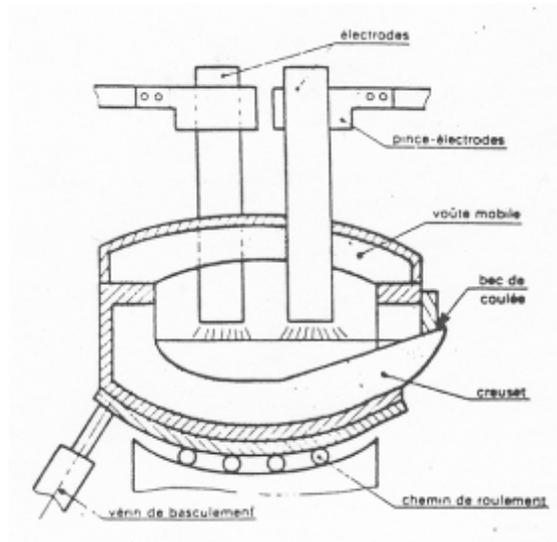
# Les fours électriques

Les fours électriques, bien que très coûteux, présentent de grands avantages :

- obtention de hautes températures, favorables à l'amorce des réactions chimiques d'affinage,
- risques d'oxydation et d'occlusion des gaz, très diminués,
- pertes réduites,
- réglage facile de la température du bain.

# Les fours à arc

De tels fours atteignent une capacité de 150, voire 200 tonnes.



Les charges métalliques sont chauffées :

- par rayonnement de l'arc, convection et réverbération sur la voûte du four,
- par échauffement direct dû au passage du courant dans la masse métallique.

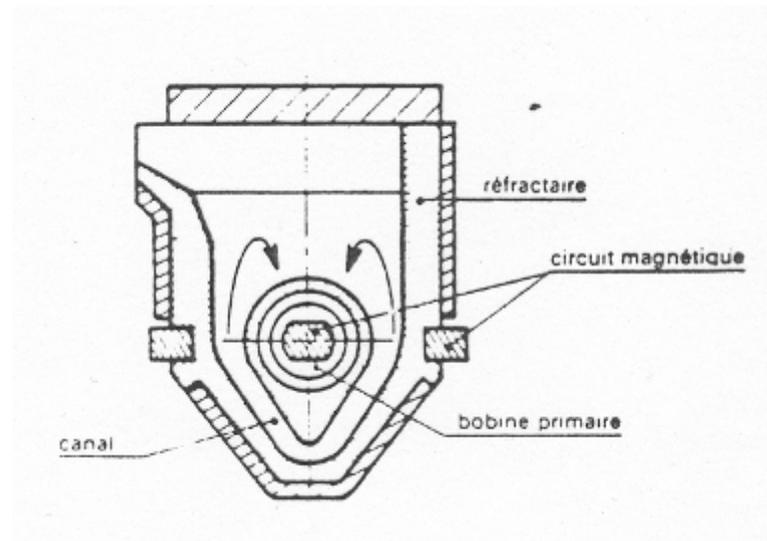
# Les fours à induction

Le chauffage par induction offre les avantages suivants :

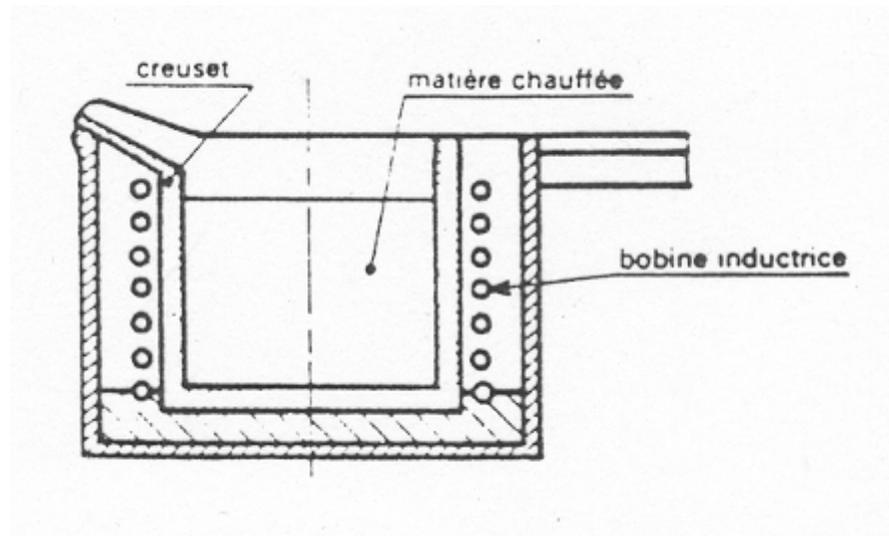
- production directe de la chaleur dans la matière à chauffer,
- obtention de hautes températures,
- inertie thermique faible, d'où meilleure tenue des réfractaires.

De tels fours peuvent atteindre une capacité de 50 tonnes et plus.

# Les fours à circuit magnétique fermé



# Fours sans circuit magnétique fermé (moyennes et hautes fréquences)



# Le moulage

- principes fondamentaux du moulage
- les principaux procédés de coulée
- les principaux procédés de moulage
- règles permettant de mieux concevoir les pièces pour le moulage

# Les procédés de moulage

Deux types de développement vont avoir une influence énorme sur la fonderie :

- la mécanisation et l'automatisation,
- la tendance à produire des pièces de très haute qualité, aux tolérances très serrées.

Classement des différents procédés de moulage en se basant sur :

- les matériaux composant le moule,
- les procédés de moulage,
- les méthodes de remplissage du moule.

GENERAL CHARACTERISTICS OF CASTING PROCESSES

PROCESS	TYPICAL MATERIALS CAST	WEIGHT (kg)		TYPICAL SURFACE FINISH ( $\mu\text{m}$ , $R_a$ )	POROSITY*	SHAPE COMPLEXITY*	DIMENSIONAL ACCURACY*	SECTION THICKNESS (mm)	
		MINIMUM	MAXIMUM					MINIMUM	MAXIMUM
Sand	All	0.05	No limit	5-25	4	1-2	3	3	No limit
Shell	All	0.05	100+	1-3	4	2-3	2	2	—
Evaporative pattern	All	0.05	No limit	5-20	4	1	2	2	No limit
Plaster	Nonferrous (Al, Mg, Zn, Cu)	0.05	50+	1-2	3	1-2	2	1	—
Investment	All (High-melting pt.)	0.005	100+	1-3	3	1	1	1	75
Permanent mold	All	0.5	300	2-3	2-3	3-4	1	2	50
Die	Nonferrous (Al, Mg, Zn, Cu)	<0.05	50	1-2	1-2	3-4	1	0.5	12
Centrifugal	All	—	5000+	2-10	1-2	3-4	3	2	100

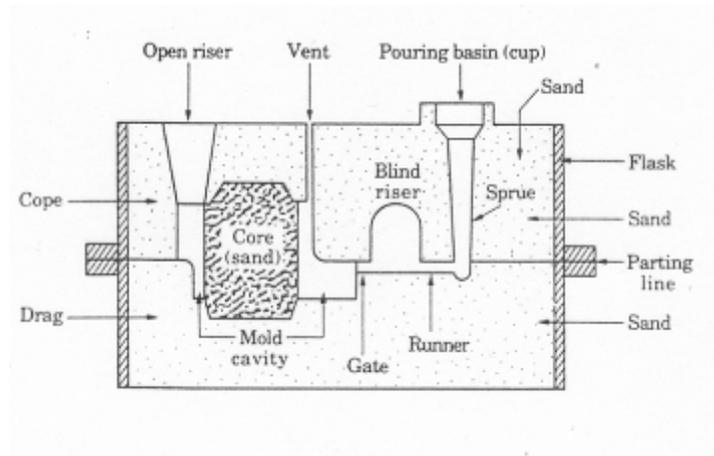
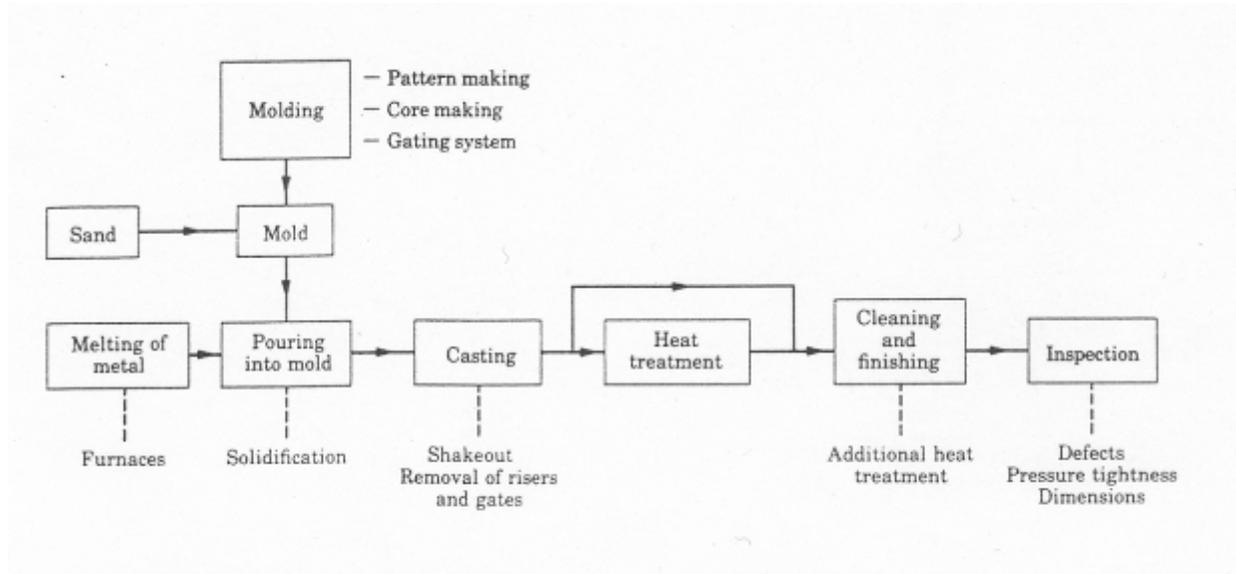
\* Relative rating: 1 best, 5 worst.

Note: These ratings are only general; significant variations can occur, depending on the methods used.

Il existe trois types de moules :

- les moules perdus,
- les moules permanents,
- les moules composites.

# Le moulage en sable



# Les modèles

CHARACTERISTICS OF PATTERN MATERIALS

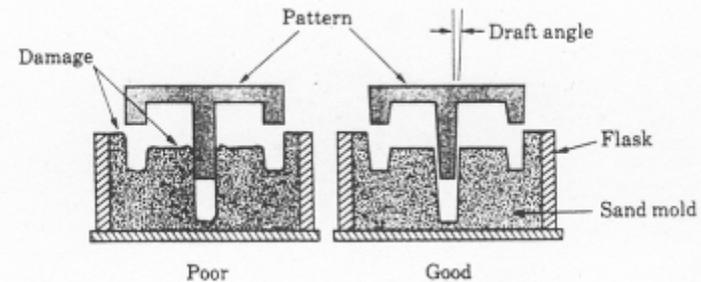
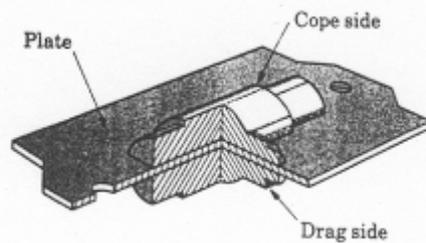
CHARACTERISTIC	RATING*				
	WOOD	ALUMINUM	STEEL	PLASTIC	CAST IRON
Machinability	E	G	F	G	G
Wear resistance	P	G	E	F	E
Strength	F	G	E	G	G
Weight <sup>b</sup>	E	G	P	G	P
Repairability	E	P	G	F	G
Resistance to:					
Corrosion <sup>c</sup>	E	E	P	E	P
Swelling <sup>c</sup>	P	E	E	E	E

Source: D. C. Ekey and W. P. Winter, *Introduction to Foundry Technology*. New York: McGraw-Hill, 1958.

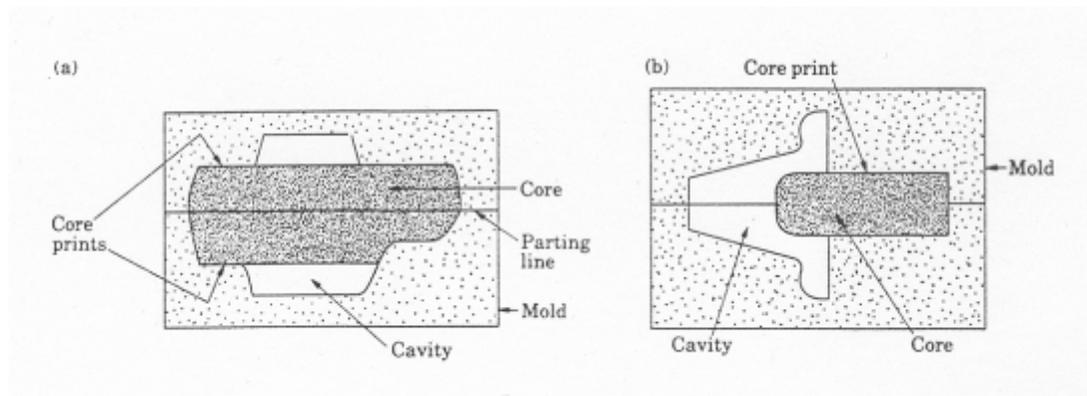
\* E, excellent; G, good; F, fair; P, poor.

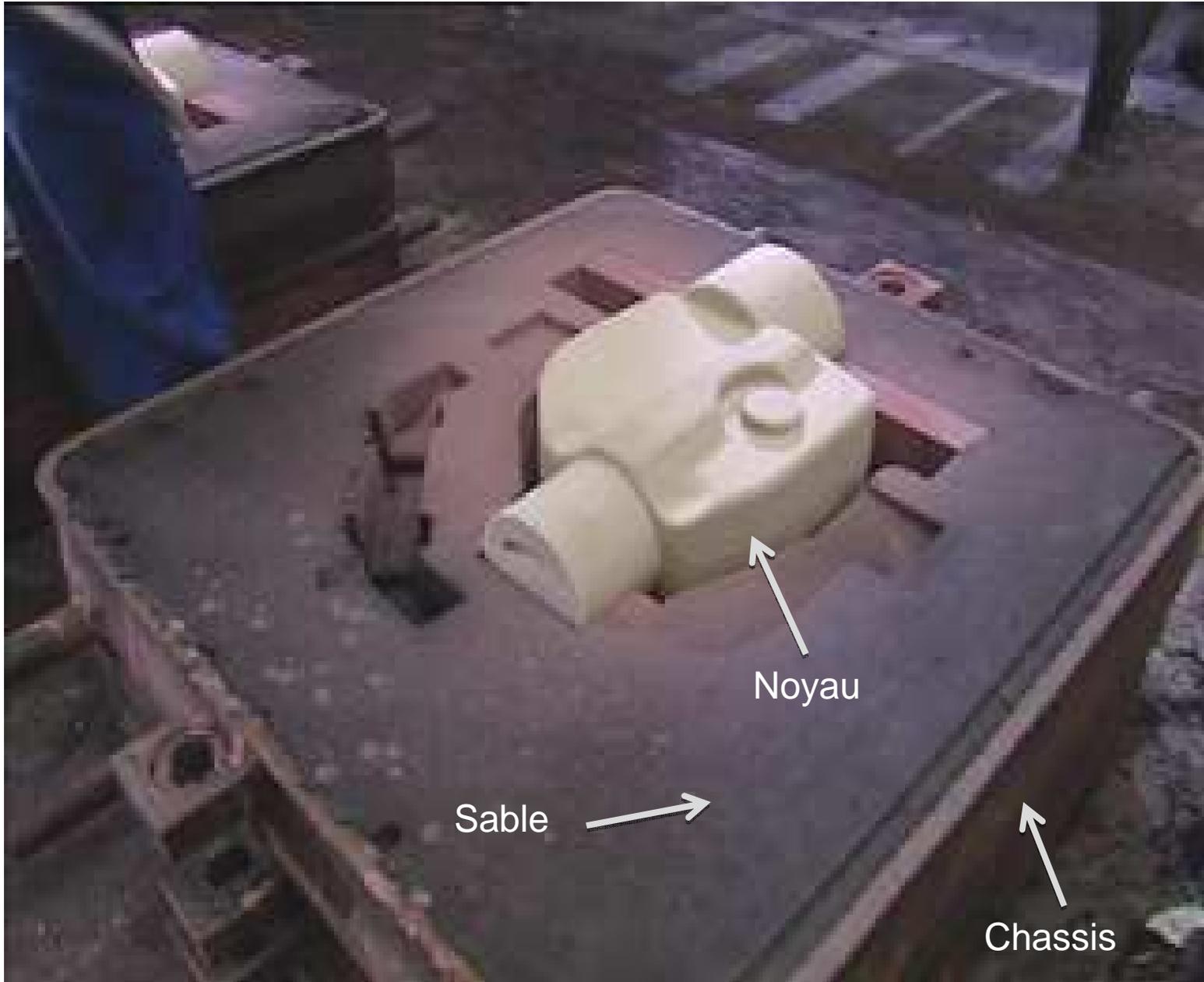
<sup>b</sup> As a factor in operator fatigue.

<sup>c</sup> By water.



# Les noyaux



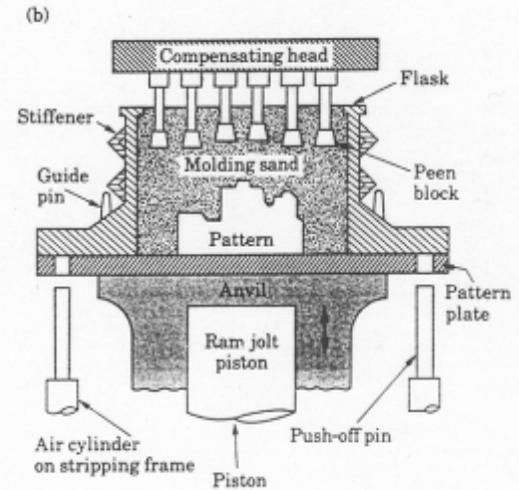
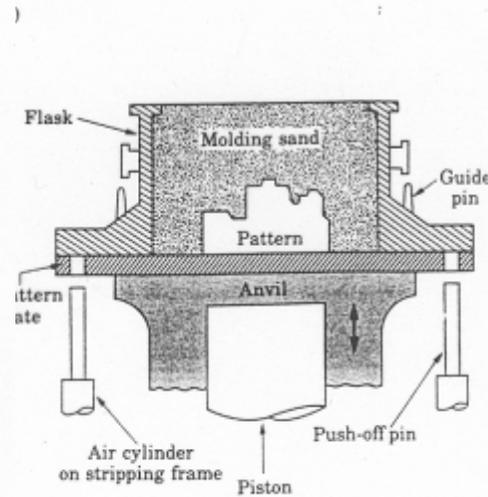
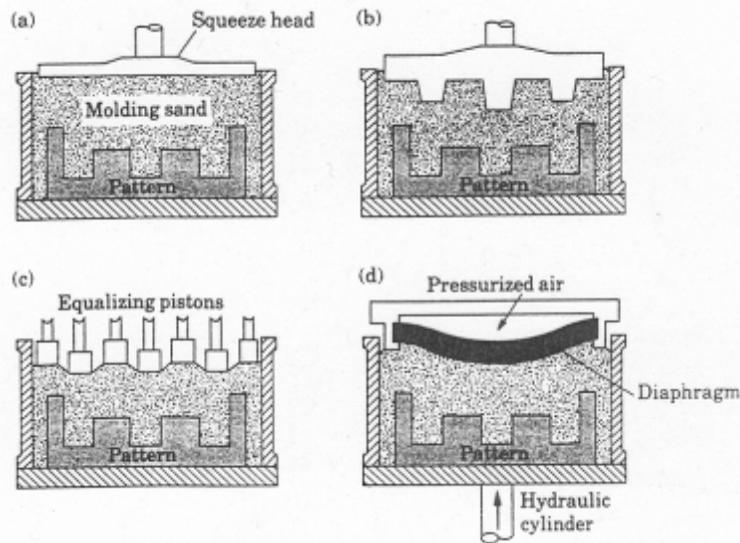


Noyau

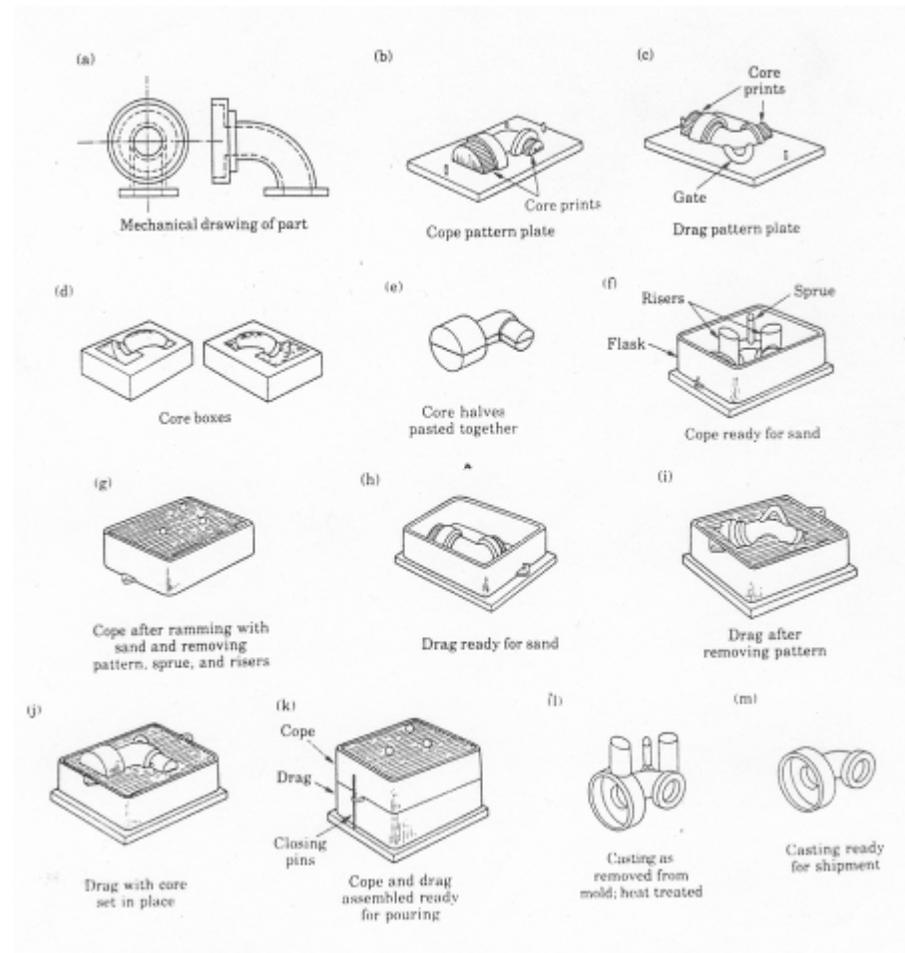
Sable

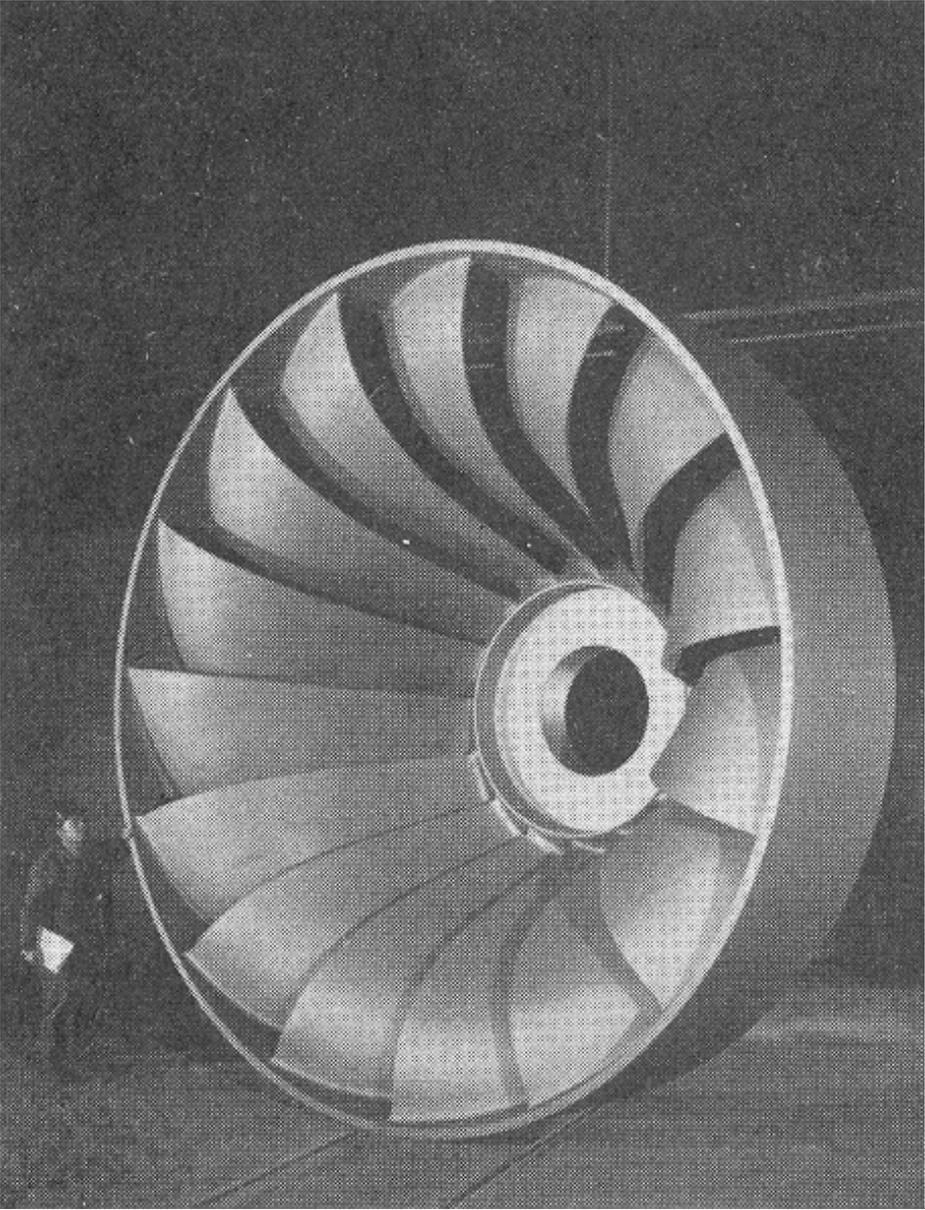
Chassis

# Les machines à fabriquer les moules en sable



# Le procédé complet de moulage en sable





# **Moulage carapace (*shell molding*)**

- **modèle**
  - **en métal ferreux ou en aluminium**
  - **chauffé à une température entre 175 et 370 °C**
  - **inséré dans une boîte contenant du sable fin et 2.5 à 4% d'une résine thermodurcissable**
- **assemblage est ensuite passé dans un four**
- **carapaces sont légères et fines (5-10 mm d'épaisseur)**
- **coût peu élevé**
- **pièces aux tolérances serrées**
- **bon fini de surface**
- **petites pièces mécaniques de grande précision**
- **composants de forme complexes comme les roues de turbines**

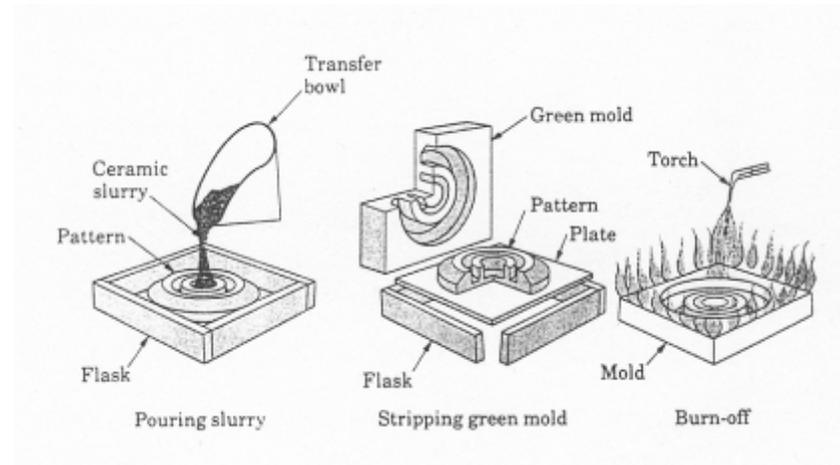
# Moulage avec évaporation du modèle (*evaporative pattern casting*)

- modèle
  - obtenu en plaçant le polystyrène dans un moule préchauffé en aluminium
  - recouvert d'une matière réfractaire
  - mis dans un châssis que l'on remplit de sable fin

# Avantages par rapport aux autres méthodes

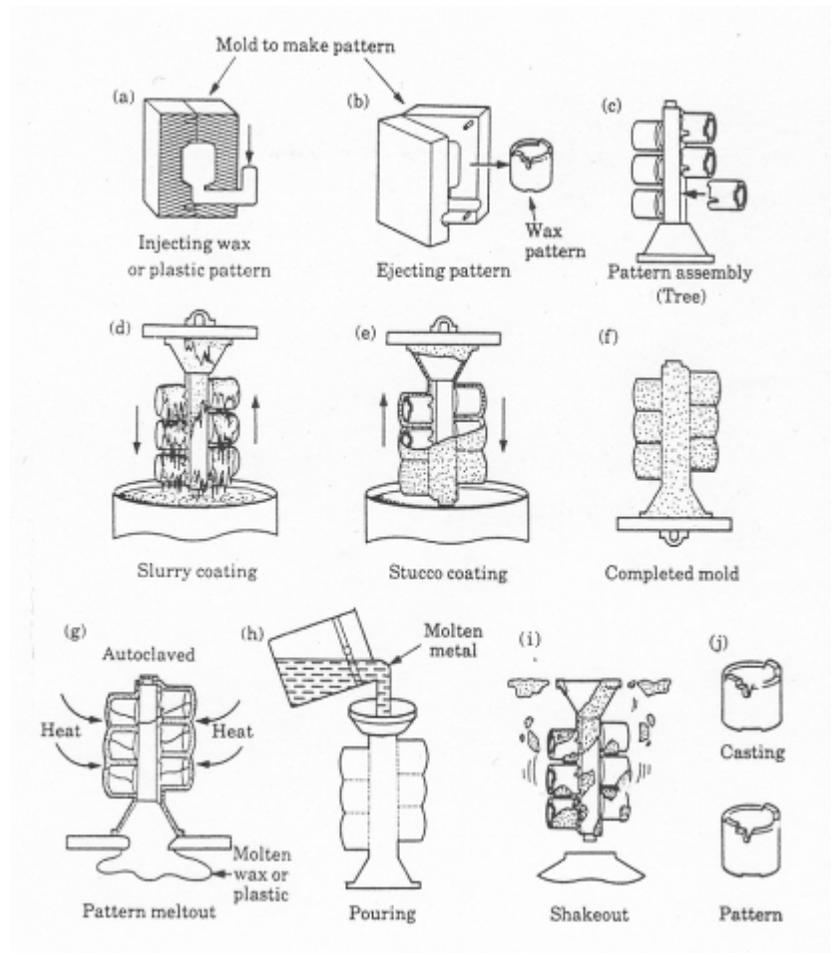
- relativement simple car pas de joint de surface ni de noyau,
- châssis peu coûteux,
- polystyrène peu coûteux et peut facilement être transformé en modèles de formes très complexes, de tailles diverses et présentant de nombreux détails de surface,
- pièce moulée exige un minimum de finition et de nettoyage,
- procédé est économique pour de grandes séries,
- le procédé peut être automatisé.
- Pièces typiques : têtes de cylindres, arbres à came, composants des freins d'automobiles, embases de machines,.....

# Moulage avec moule en céramique



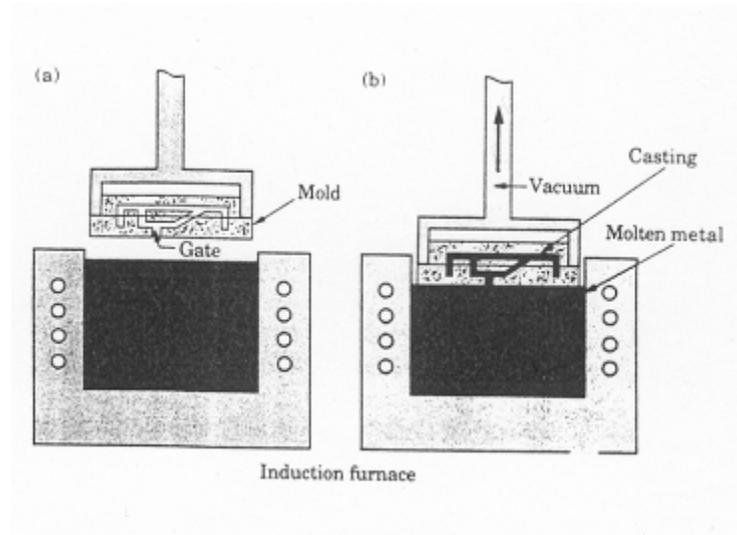
- bonne précision dimensionnelle
- bon fini de surface
- formes peuvent être compliquées
- procédé est néanmoins coûteux
- pièces de 700 kg ont été obtenues par ce procédé.

# Moulage en cire perdue (*investment casting*)



- procédé assez coûteux
- convient bien pour le moulage d'alliages à haut point de fusion.
- peut produire des pièces de 19 à 35 kg
- très bon état de surface
- tolérances serrées
- essentiellement des équipements de bureaux et des composants mécaniques (engrenages, cames,...).

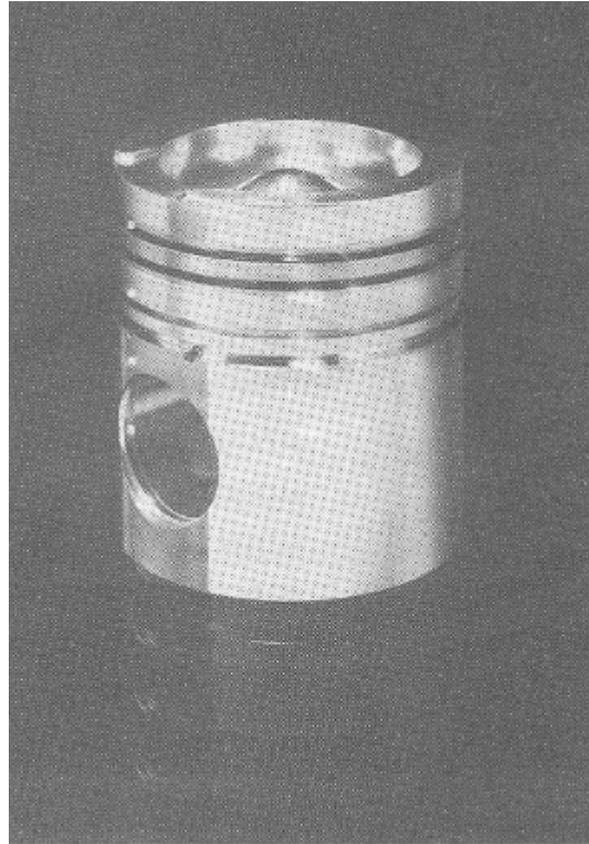
# Le moulage sous vide (vacuum casting)



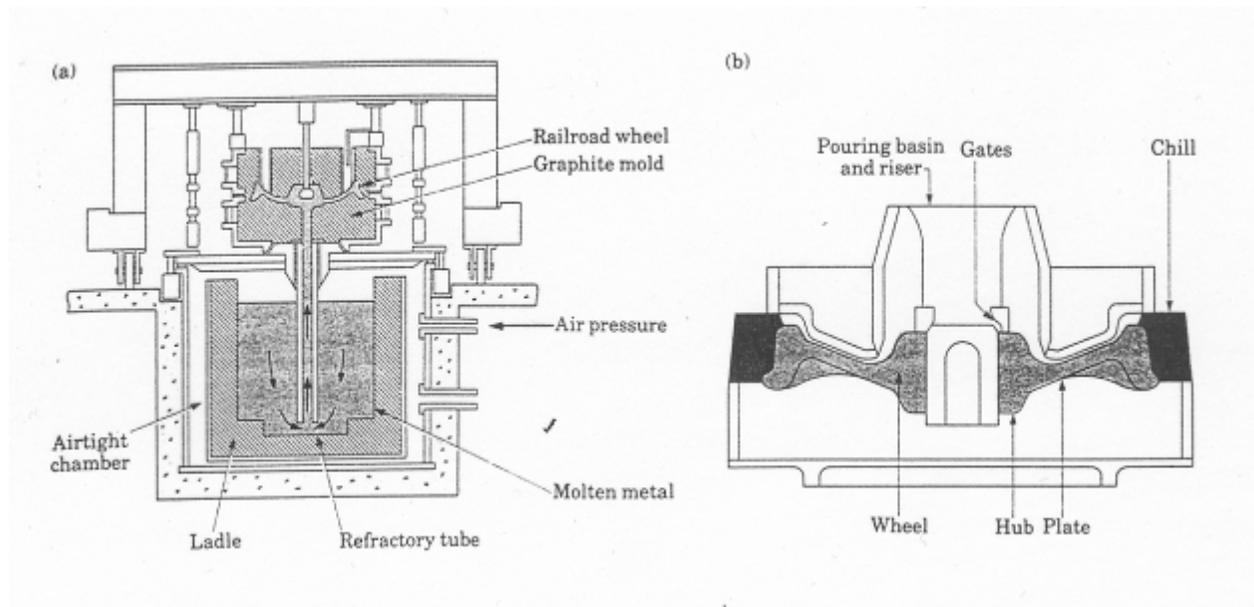
- procédé permet également de produire des formes complexes jusqu'à des poids de 70 kg.

# Moulage en coquille (*permanent-mold casting*)

- deux demi-moules sont réalisés en acier, en bronze, en graphite ou en métal réfractaire
- deux demi-moules sont pressés l'un sur l'autre par des moyens mécaniques et chauffés jusque 150-200 °C
- pour accélérer le refroidissement du moule, on utilise de l'eau
- procédé peut être automatisé pour de grandes séries
- pas économique pour de petites séries
- utilisé surtout pour les métaux à bas point de fusion (aluminium, magnésium, cuivre,.....)
- bon fini de surface
- tolérances serrées
- poids des pièces ne dépassent généralement pas 55 kg
- pièces typiques : les pistons d'automobiles, les têtes de cylindres,



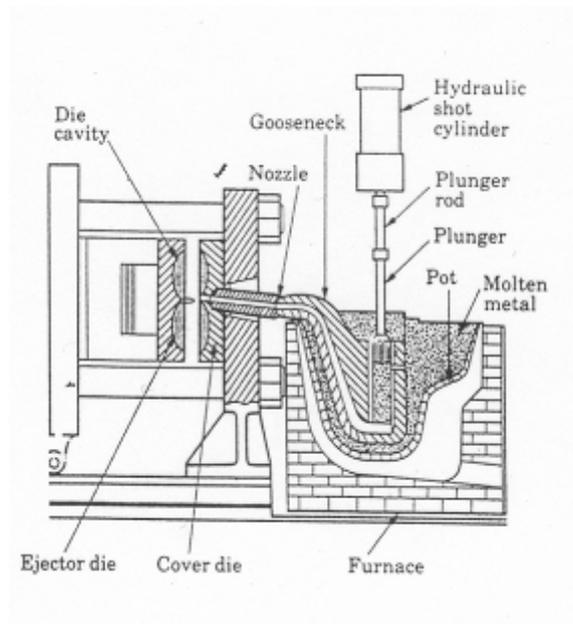
# Moulage basse pression (*pressure casting*)



# Moulage sous pression (die casting)

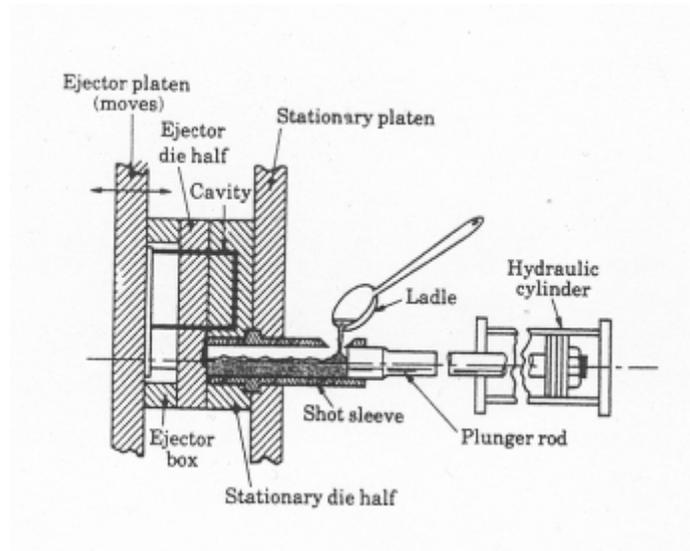
- pièces typiques : carburateurs, moteurs, outils, jouets,...
- poids des pièces de 90 g à 25 kg

## *Moulage en chambre chaude*

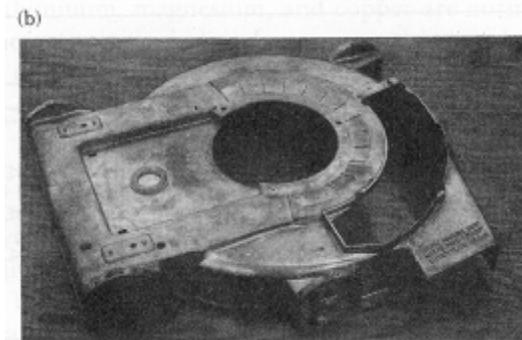
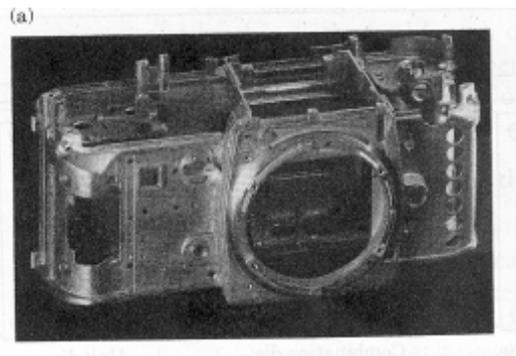
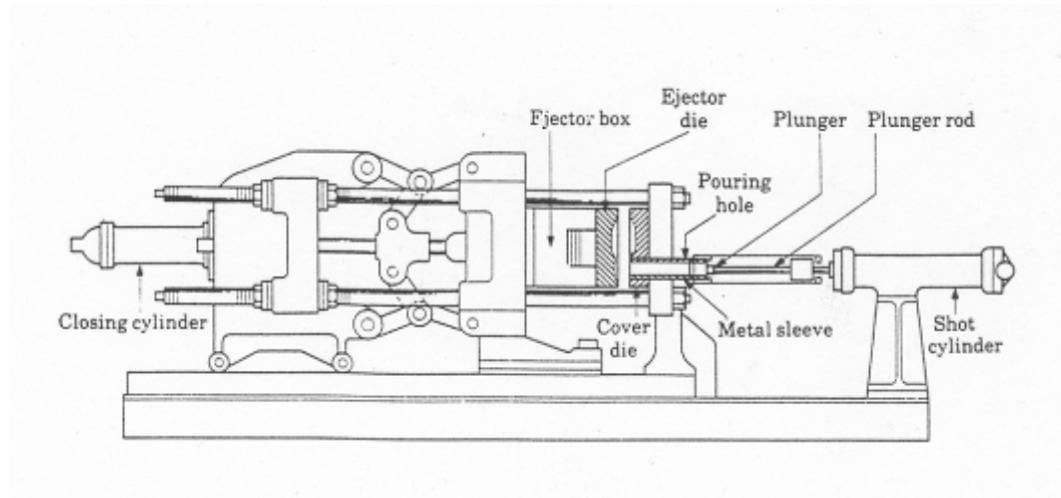


- alliages de plomb, d'étain et de zinc
- pressions dans ces machines peuvent atteindre 35 MPa
- cadence peut atteindre 900 cycles par heure

## *Moulage en chambre froide*



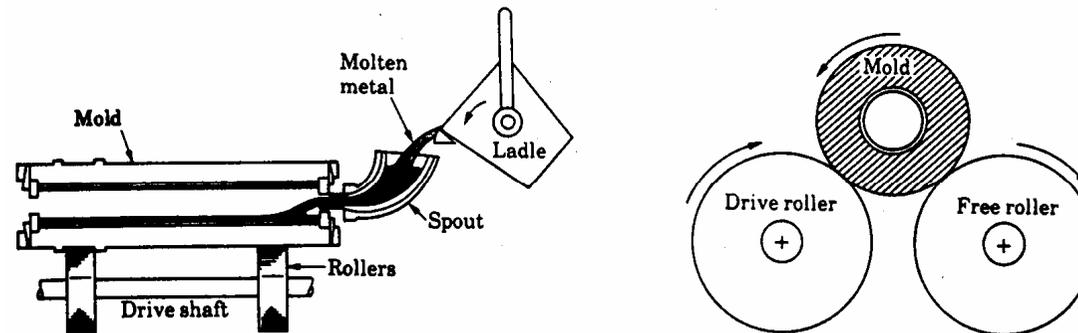
- aluminium, magnésium et laiton
- pressions rencontrées vont de 20 à 70 MPa mais peuvent aller jusqu'à 150 MPa
- machines doivent exercer des forces allant de 25 tonnes à 3000 tonnes



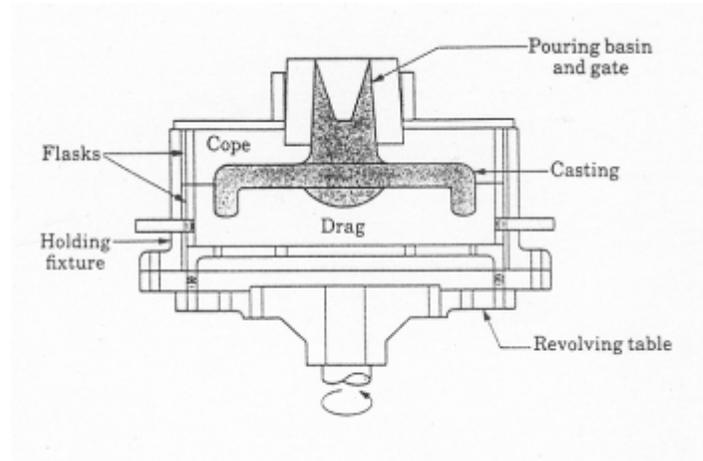
# Moulage centrifuge (*centrifugal casting*)

## *Moulage centrifuge proprement dit*

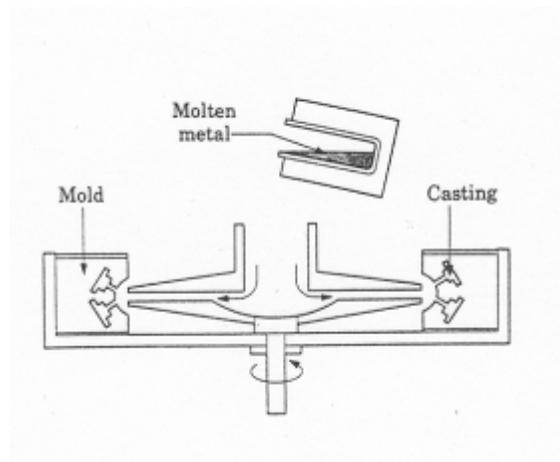
- pièces dont le diamètre varie de 13 mm à 3m et de longueur allant jusque 9 m. L'épaisseur, quant à elle peut aller de 6 à 125 mm.



## *Moulage semi-centrifuge*



## *Centrifugation*



PROCESS	TYPICAL MATERIALS CAST	WEIGHT (kg)		TYPICAL SURFACE FINISH ( $\mu\text{m}$ , $R_a$ )	POROSITY*	SHAPE COMPLEXITY*	DIMENSIONAL ACCURACY*	SECTION THICKNESS (mm)	
		MINIMUM	MAXIMUM					MINIMUM	MAXIMUM
Sand	All	0.05	No limit	5-25	4	1-2	3	3	No limit
Shell	All	0.05	100+	1-3	4	2-3	2	2	—
Evaporative pattern	All	0.05	No limit	5-20	4	1	2	2	No limit
Plaster	Nonferrous (Al, Mg, Zn, Cu)	0.05	50+	1-2	3	1-2	2	1	—
Investment	All (High-melting pt.)	0.005	100+	1-3	3	1	1	1	75
Permanent mold	All	0.5	300	2-3	2-3	3-4	1	2	50
Die	Nonferrous (Al, Mg, Zn, Cu)	<0.05	50	1-2	1-2	3-4	1	0.5	12
Centrifugal	All	—	5000+	2-10	1-2	3-4	3	2	100

\* Relative rating: 1 best, 5 worst.

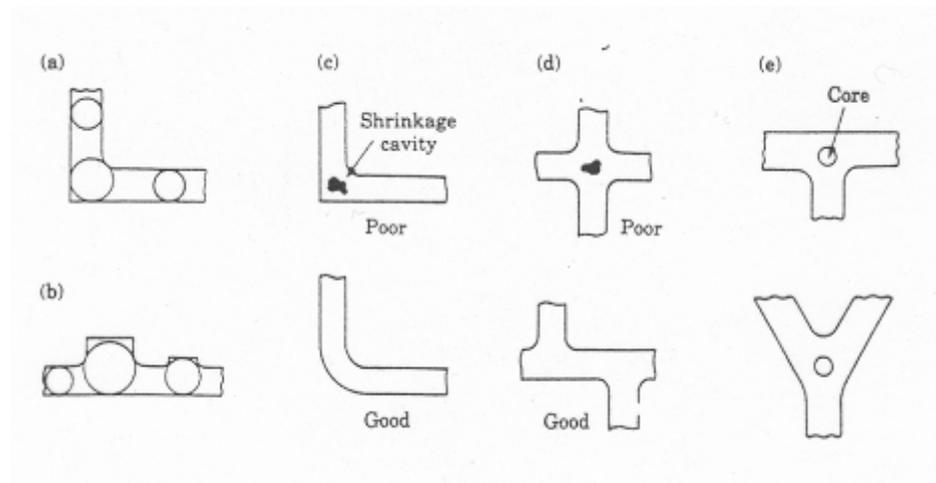
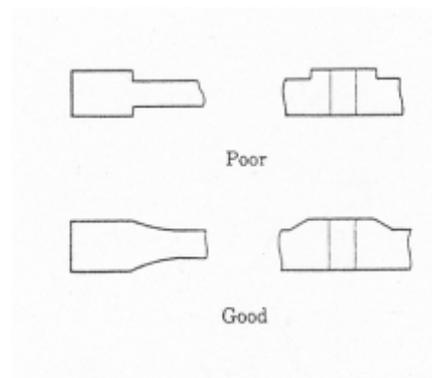
Note: These ratings are only general; significant variations can occur, depending on the methods used.

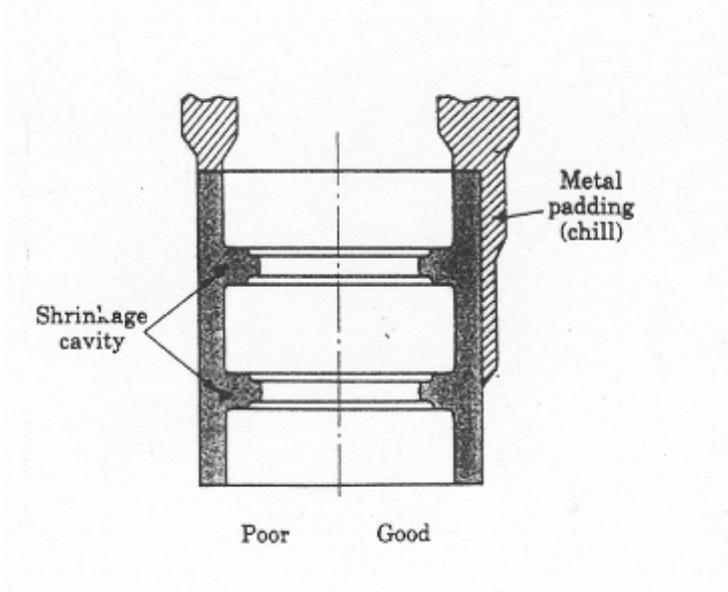
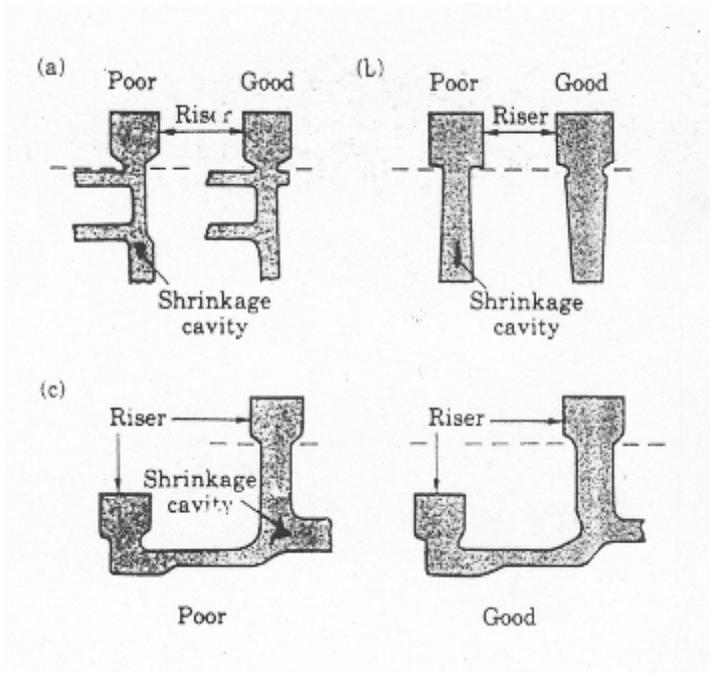
# Le moulage

- principes fondamentaux du moulage
- les principaux procédés de coulée
- les principaux procédés de moulage
- règles permettant de mieux concevoir les pièces pour le moulage

# Conception des moules

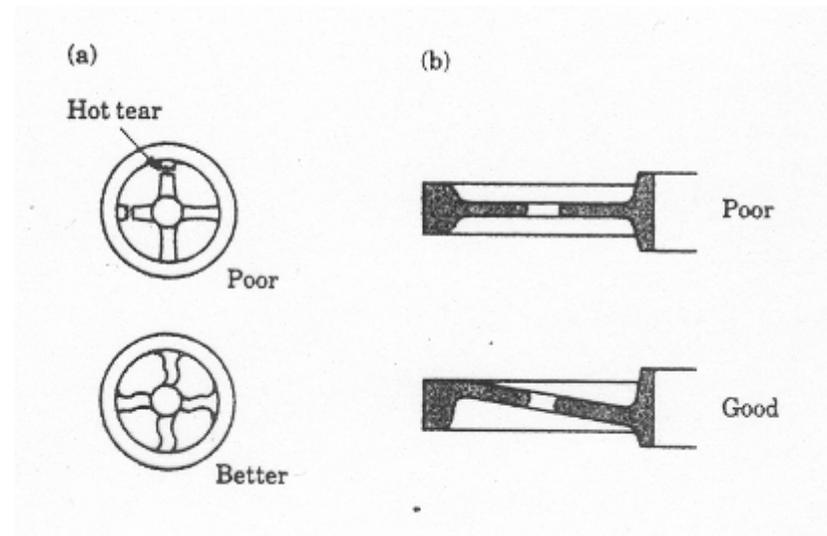
## *Angles et épaisseurs*



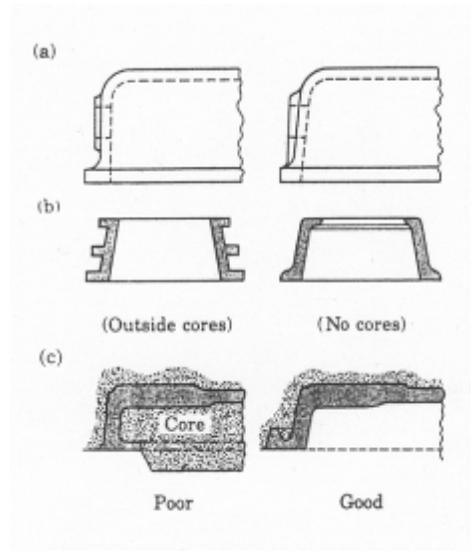


# *Surfaces planes*

## *Retrait*



# Noyaux



# Coût du moulage

PROCESS	COST*			PRODUCTION RATE (Pc/hr)
	DIE	EQUIPMENT	LABOR	
Sand	L	L	L-M	<20
Shell	L-M	M-H	L-M	<50
Plaster	L-M	M	M-H	<10
Investment	M-H	L-M	H	<1000
Permanent mold	M	M	L-M	<60
Die	H	H	L-M	<200
Centrifugal	M	H	L-M	<50

\* L, low; M, medium; H, high.