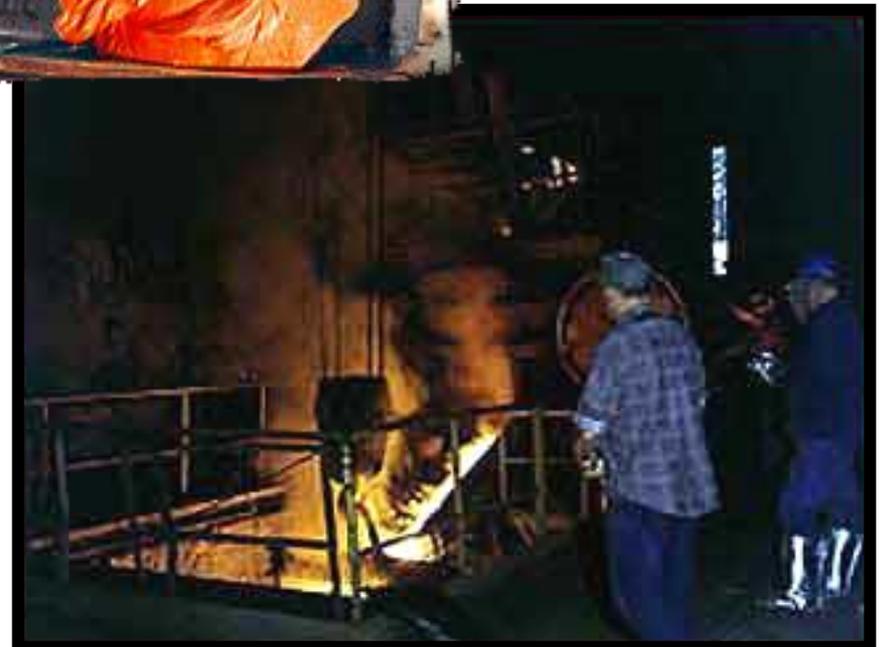


Modifiez le style du titre

# Procédés de fabrication

*Fonderie*

*Introduction à la fonderie*



## Principe

- La Fonderie est l'industrie de mise en oeuvre des **produits métalliques moulés** (aciers, aluminium, cuivre, fontes, magnésium, plomb, titane, zinc...).

## Principe

- La Fonderie est l'industrie de mise en oeuvre des **produits métalliques moulés** (aciers, aluminium, cuivre, fontes, magnésium, plomb, titane, zinc...).
- Elle consiste à couler un métal ou un alliage **en fusion** dans un moule, pour obtenir après solidification une pièce dont les formes reproduisent celles du moule.

## Principe

- La Fonderie est l'industrie de mise en oeuvre des **produits métalliques moulés** (aciers, aluminium, cuivre, fontes, magnésium, plomb, titane, zinc...).
- Elle consiste à couler un métal ou un alliage **en fusion** dans un moule, pour obtenir après solidification une pièce dont les formes reproduisent celles du moule.
- La fonderie maîtrise ainsi la **métallurgie** (métaux et alliages) et la **géométrie** (formes et volumes) des pièces qu'elle réalise.



## Principe

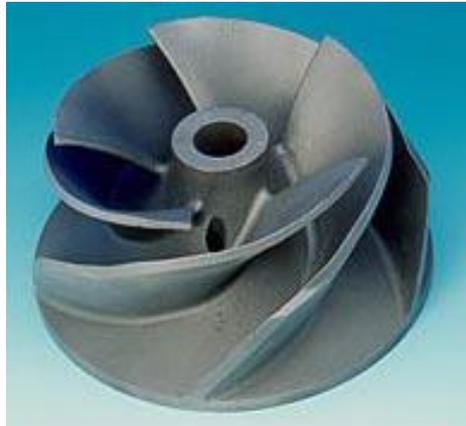
- La Fonderie est l'industrie de mise en oeuvre des **produits métalliques moulés** (aciers, aluminium, cuivre, fontes, magnésium, plomb, titane, zinc...).
- Elle consiste à couler un métal ou un alliage **en fusion** dans un moule, pour obtenir après solidification une pièce dont les formes reproduisent celles du moule.
- La fonderie maîtrise ainsi la **métallurgie** (métaux et alliages) et la **géométrie** (formes et volumes) des pièces qu'elle réalise.
- Elle est présente sur tous les **grands marchés à travers le monde** (aéronautique, automobile, chimie, construction, défense, énergie, ferroviaire, mécanique, télécommunications...)

## Marchés

- **BATIMENT**  
Chaudières, Radiateurs, Robinets, Compteurs, Baignoires, Serrures
- **TRAVAUX PUBLICS**  
Tuyaux d'adduction d'eau et d'assainissement, Regards de chaussées, Trappes de voirie
- **MOBILIER URBAIN**  
Candélabres, Cloches, Fontaines, Statues
- **TRANSPORTS**  
Ferroviaires, Maritimes, Aéronautiques
- **AGRICULTURE**  
Tracteurs , Machines, Irrigation



Marchés



- INDUSTRIES MECANIQUES ET ELECTRIQUES**  
 Génie Civil, Manutention, Terrassement, Mines et Forages, Sidérurgie, Levage, Machine-outils, Pompes, Vannes, Compteurs, Compresseurs, Fours, Moteurs, Turbines, Armement
- AUTOMOBILE, CYCLE - MOTO, POIDS LOURDS**  
 Moteurs, Transmissions, Freins, Suspensions, Climatisation
- ELECTRO - MENAGER**  
 Carters, Pièces mécaniques, Articles culinaires, Téléphonie, Bureautique
- DECORATION - DIVERS**  
 Statues, Articles de sports, Articles de décoration



*Introduction à la fonderie*

**Marchés**



Variété des dimensions



*Introduction à la fonderie*

**Variété des matériaux**



**Fonte**

**Zinc**



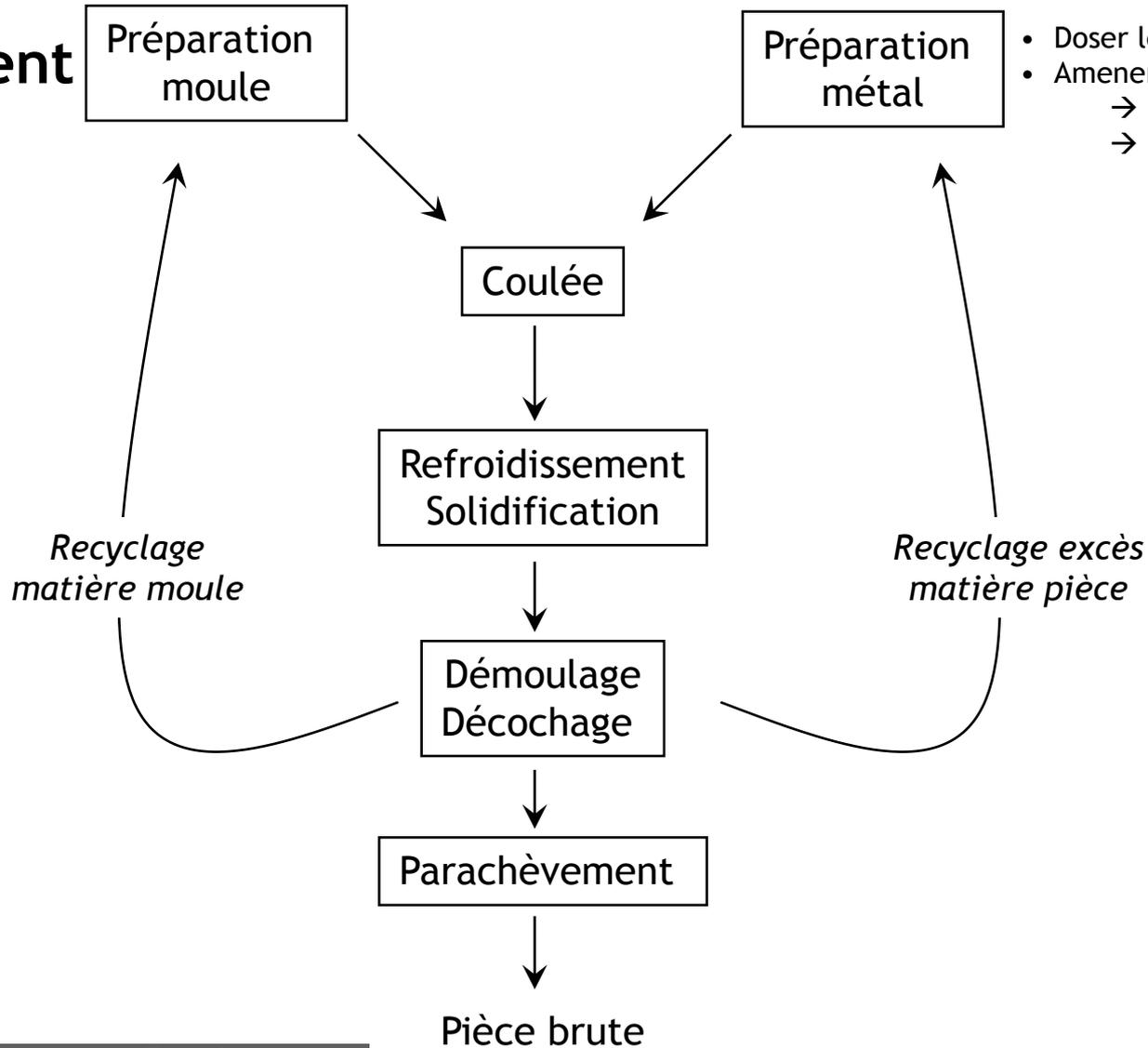
**Titane**

**Acier**



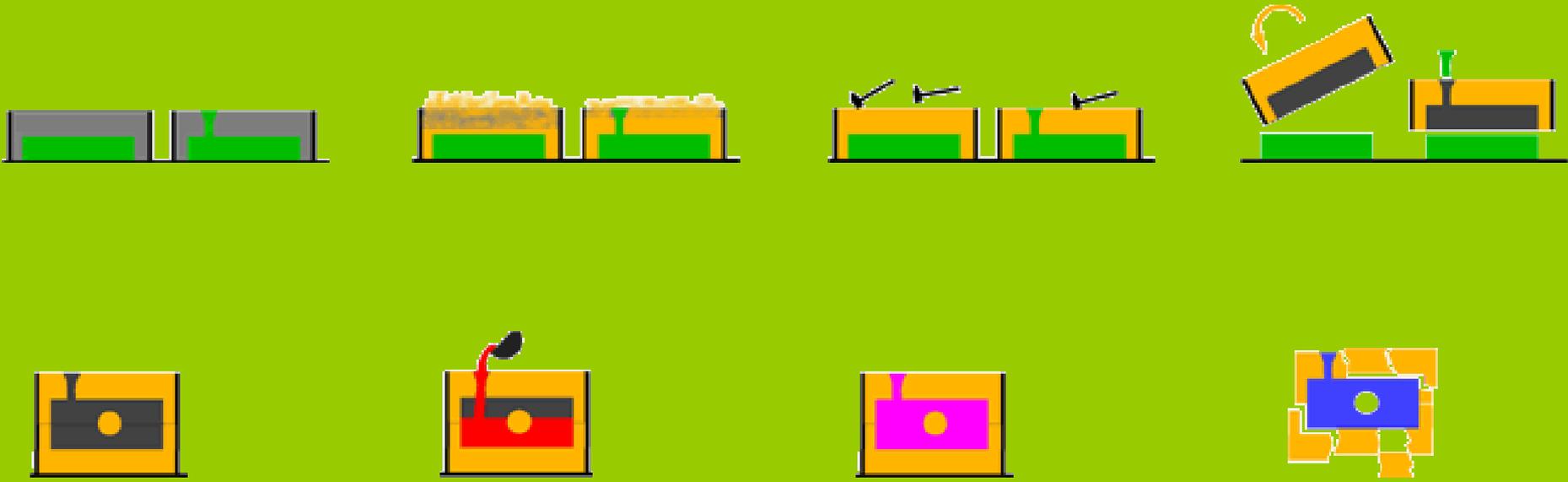
# Fonderie : les étapes

## Déroulement



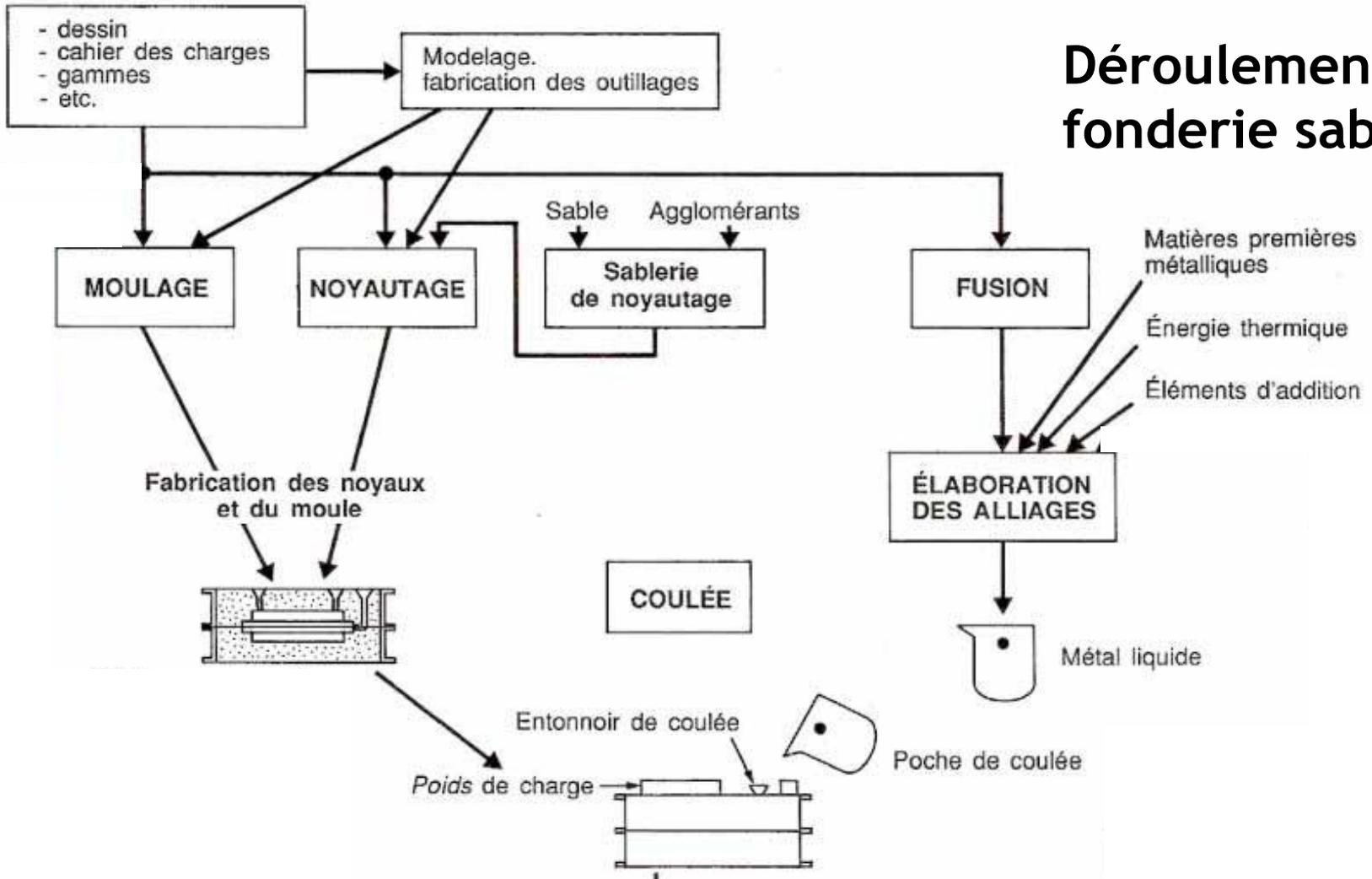
- Doser les composants
- Amener à l'état liquide
  - fonte : env 1500°C
  - alu : 5 à 700°C

Processus fonderie sable : vue d'ensemble



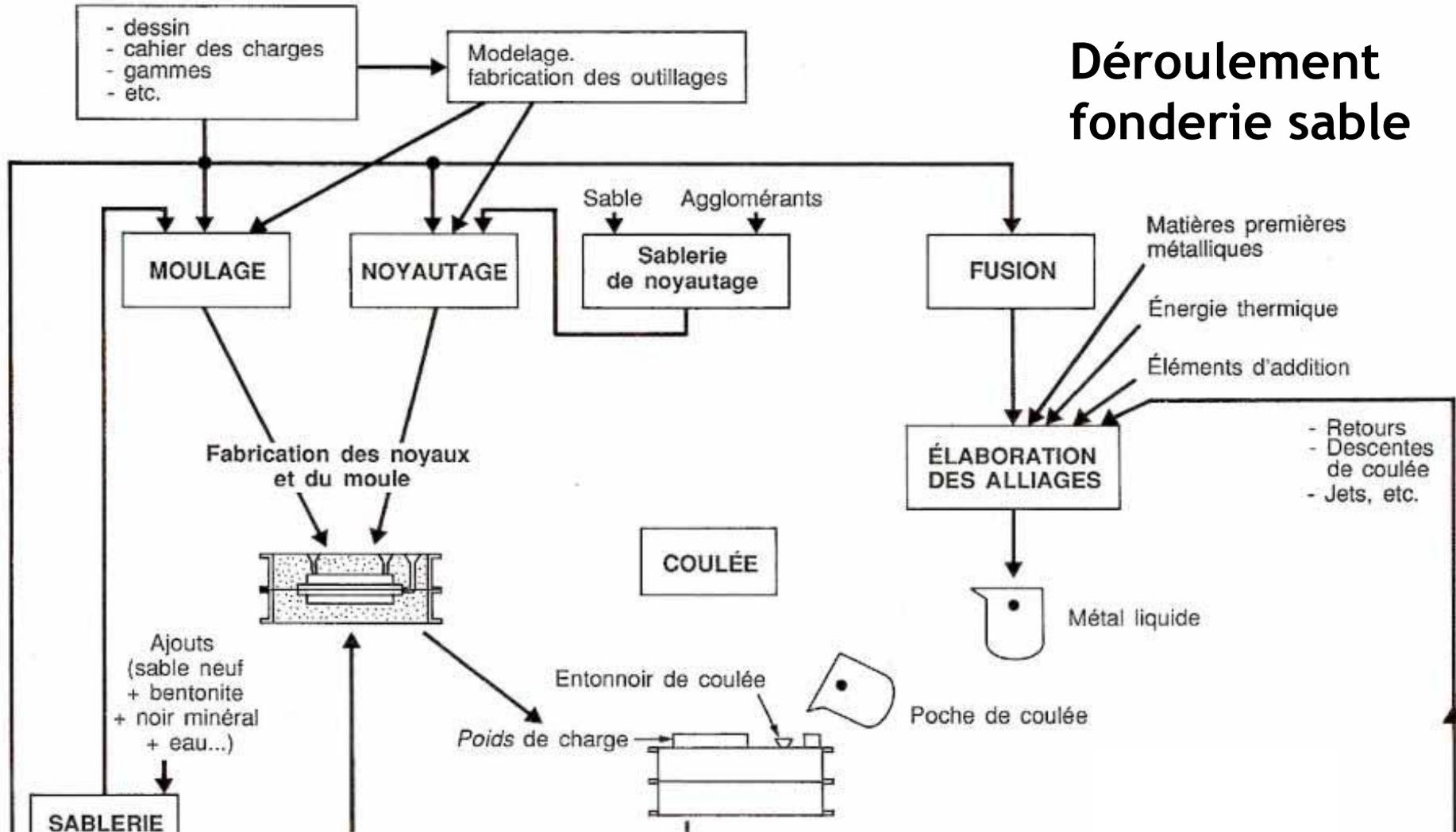
# Fonderie sable

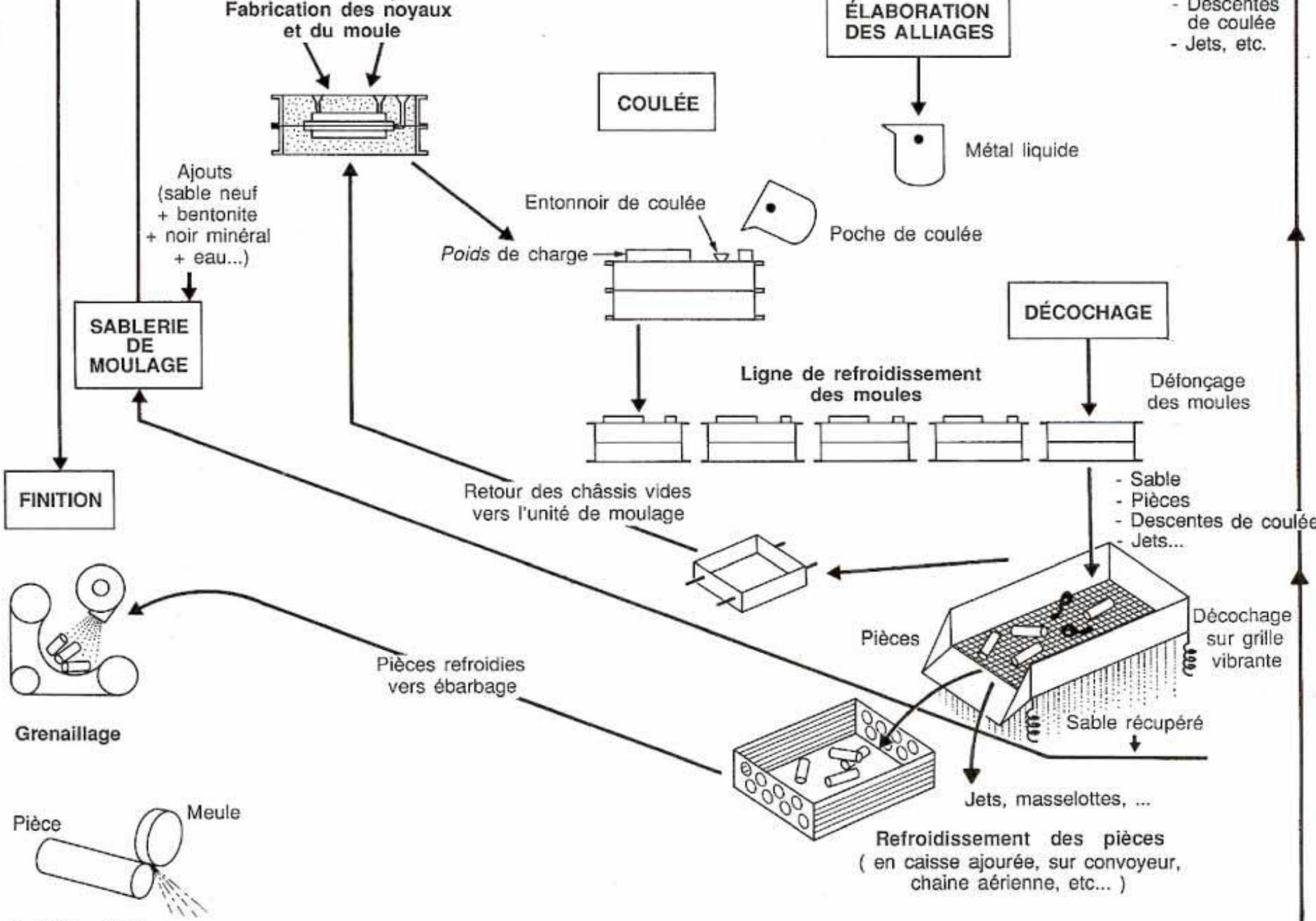
## Déroulement fonderie sable



Fonderie sable

Déroulement fonderie sable





Utilisation de modèles pour réaliser les moules

de



→ Les modèles reprennent la géométrie la pièce et des éléments de « service »



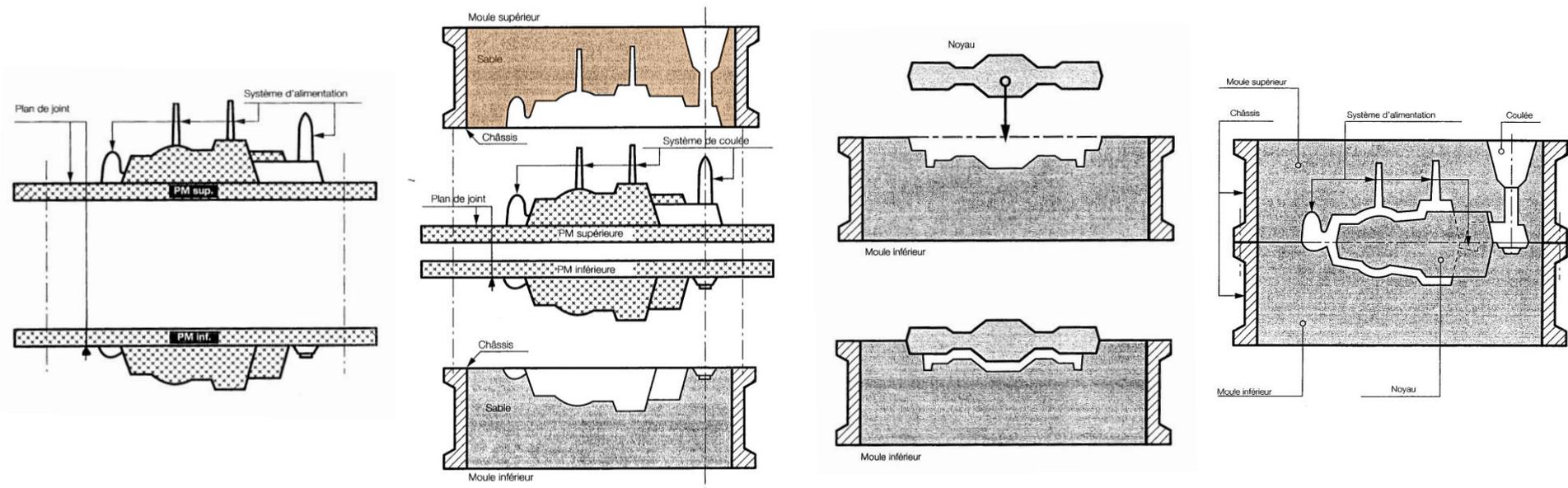
## Fonderie sable

Les modèles peuvent être en bois, en métal, ...  
Ils peuvent être usinés dans la masse ou obtenus par électro érosion (enfonçage)



# Introduction à la fonderie

Le sable est ensuite versé puis compacté au dessus du modèle.  
Il est contenu par un châssis



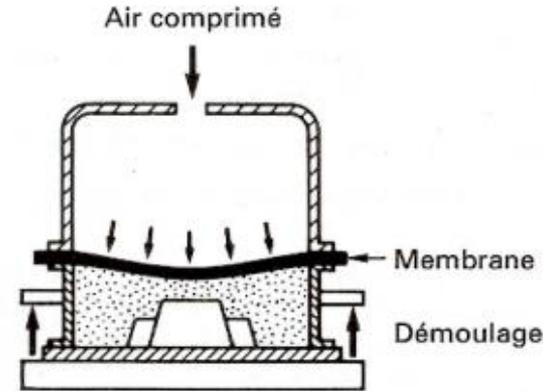
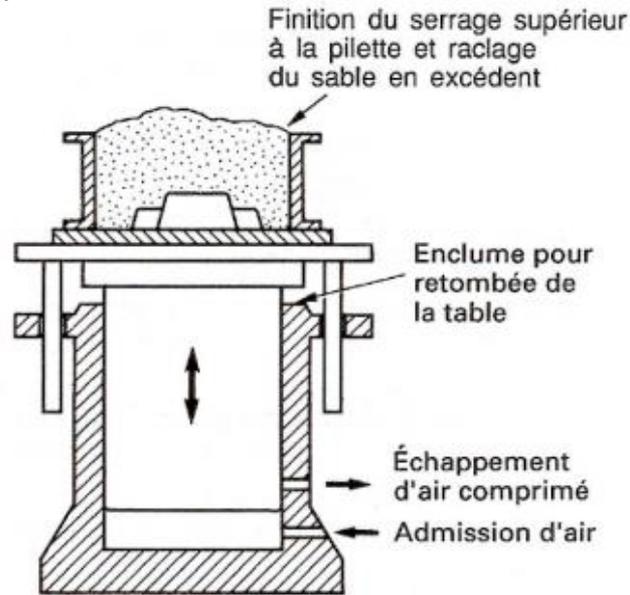
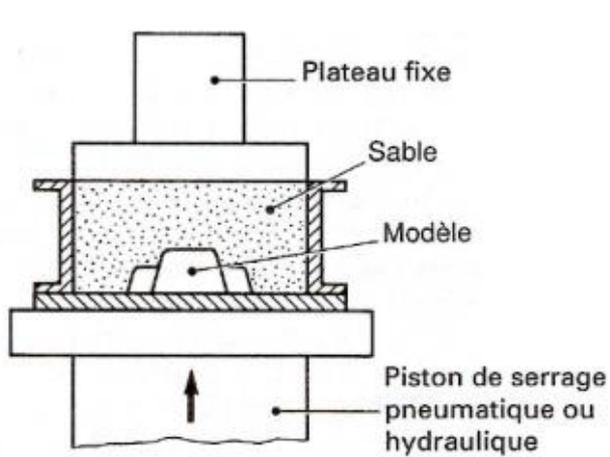
## Fonderie sable

Préparation du moule par versement puis tassement de sable dans un châssis, sur un modèle :



# Fonderie sable

La compacité du sable constituant le moule est déterminante.  
 Il existe différents moyens de « serrer » le sable autour du modèle



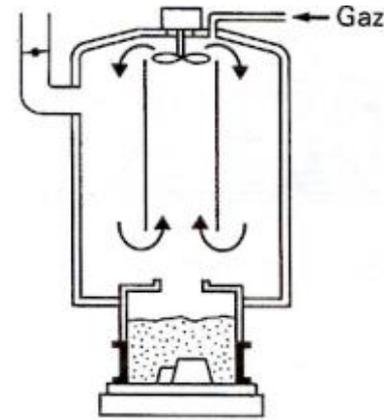
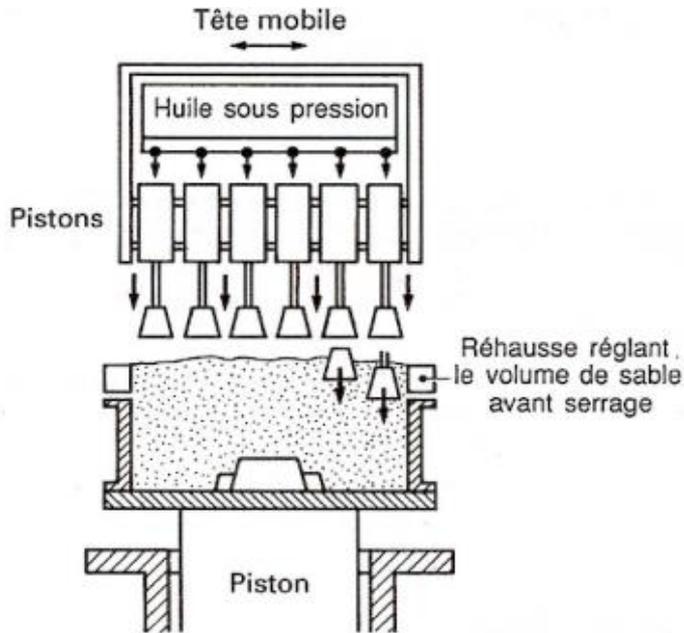
Serrage par pression

Serrage par secousse

Serrage par membrane souple

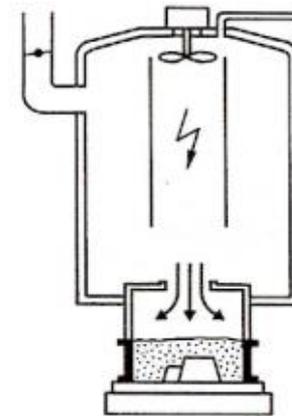
# Fonderie sable

La compacité du sable constituant le moule est déterminante. Il existe différents moyens de « serrer » le sable autour du modèle



1<sup>er</sup> temps

Une quantité dosée de gaz est introduite dans la chambre de combustion. Le mélange gaz-air est brassé



2<sup>o</sup> temps

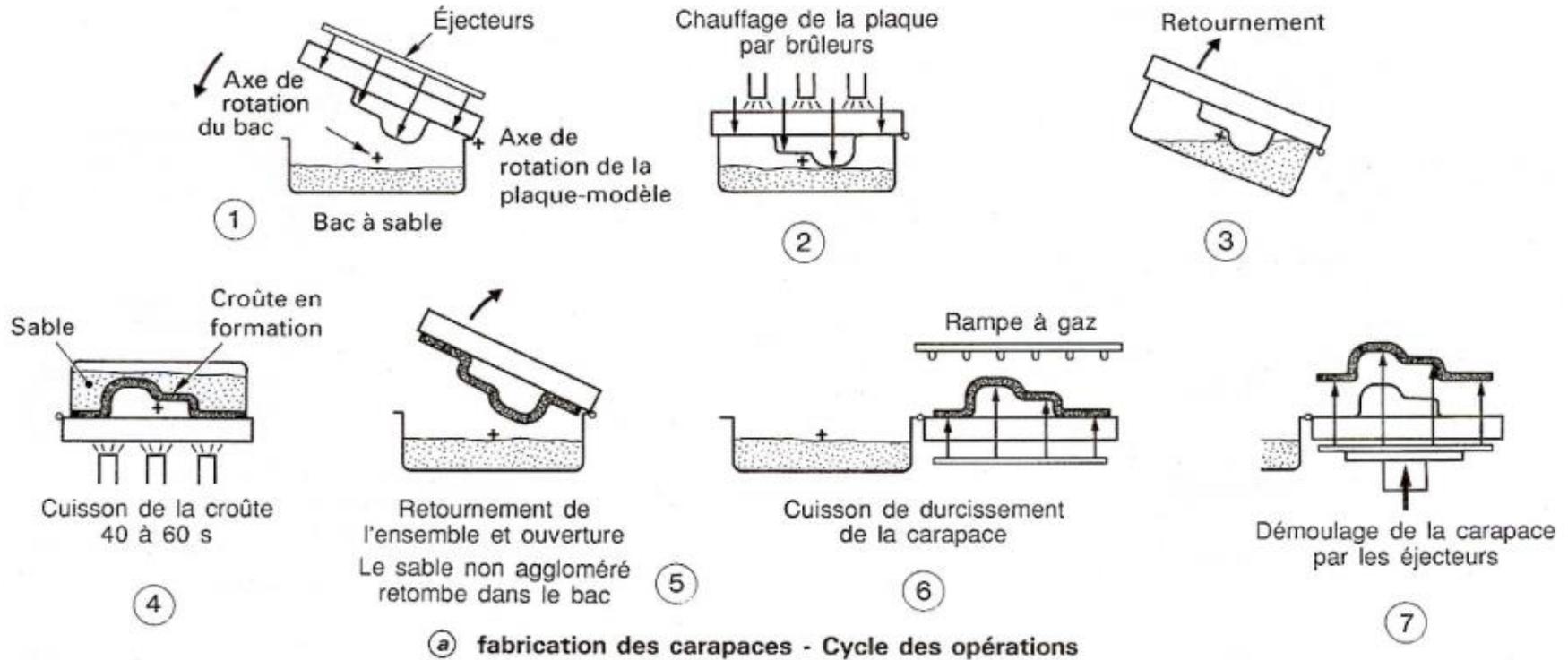
Allumage, explosion, détente et serrage du sable

Machines à piston multiples

Serrage du sable au gaz

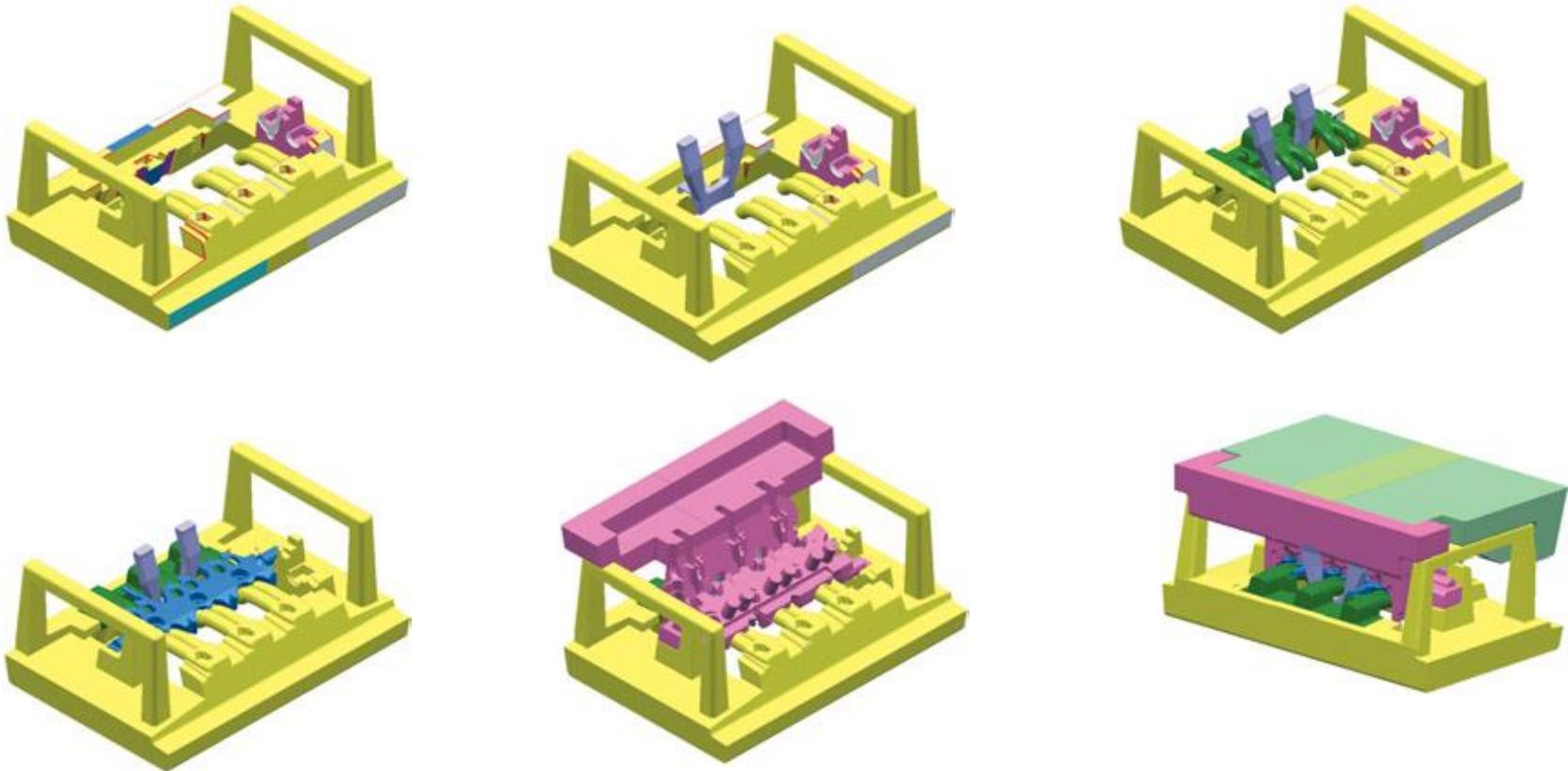
# Fonderie sable

Un autre moyen de garantir la résistance du moule, par réaction physico-chimique, est le moulage en carapace



## Fonderie sable

Les noyaux permettent de réserver certaines zones de la pièce, par ex. pour des tubulures et des carters : ils empêchent le liquide en fusion de remplir tout le moule, permettant ainsi de garder des « vides » dans la pièce



Les assemblages de noyaux peuvent réaliser des formes complexes

## Fonderie sable

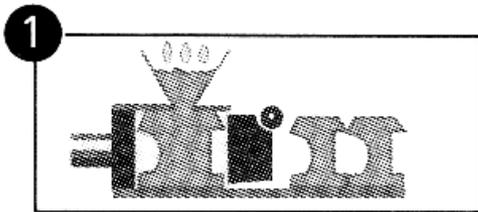
La préparation des noyaux suit le même processus que les moules, leur composition étant différente.  
Ces noyaux sont ensuite assemblés, manuellement ou à l'aide de robots

Préparation des noyaux  
pour des carters moteurs

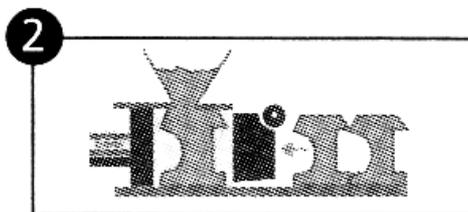


Fonderie sable

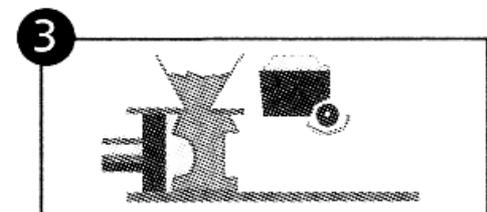
Il est également possible d'automatiser la réalisation de moules : une même « motte » pourra alors être utilisée pour deux moules successifs



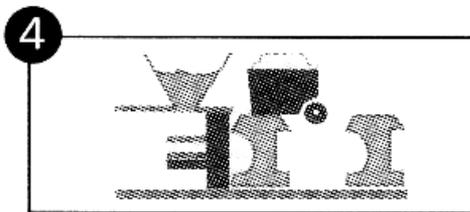
1 Tir (injection de sable)



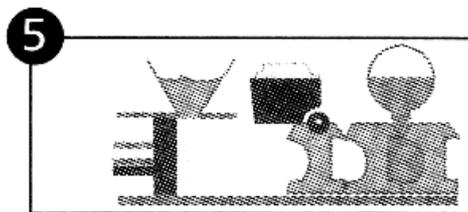
2 Serrage de la motte



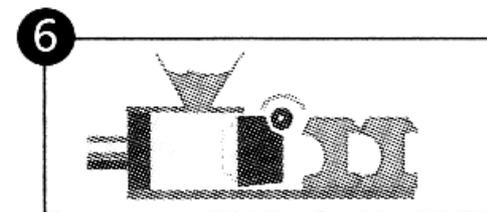
3 Démoulage de la plaque pivotante



4 Jonction et transport des mottes



5 Démoulage de la plaque de serrage



6 Fermeture de la chambre de moulage

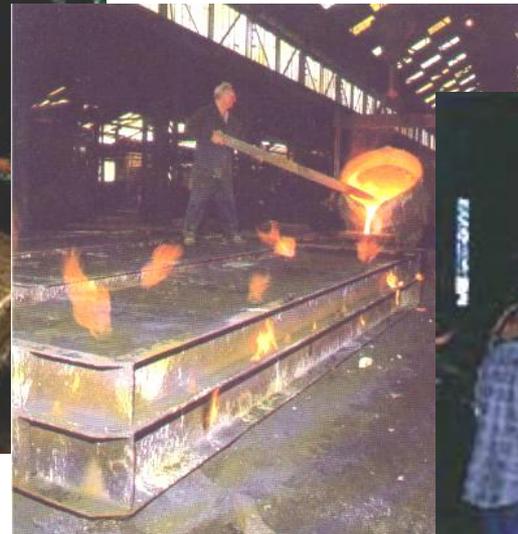
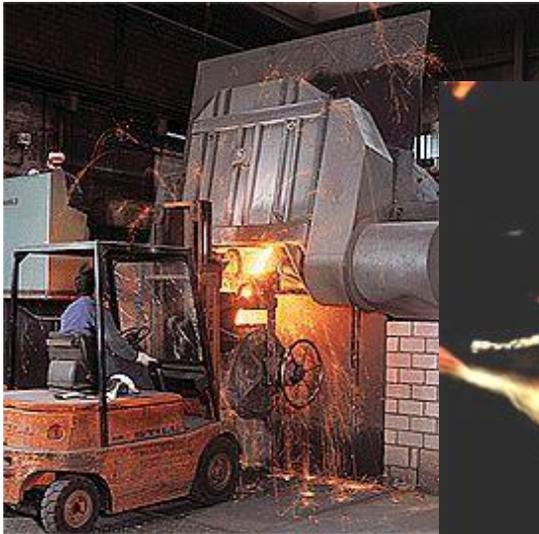
· Schéma de machines de moulage (DISAgroup France).

## Fonderie sable

Après la préparation du moule, le métal en fusion peut être coulé.

La coulée déterminera la bonne santé de la pièce, elle dépend de :

- la préparation de l'alliage coulé
- la configuration des systèmes d'attaque, de filtrage, de répartition de l'alliage



## Fonderie sable

Après la préparation du moule, le métal en fusion peut être coulé.

La coulée déterminera la bonne santé de la pièce, elle dépend de :

- la préparation de l'alliage coulé
- la configuration des systèmes d'attaque, de filtrage, de répartition de l'alliage

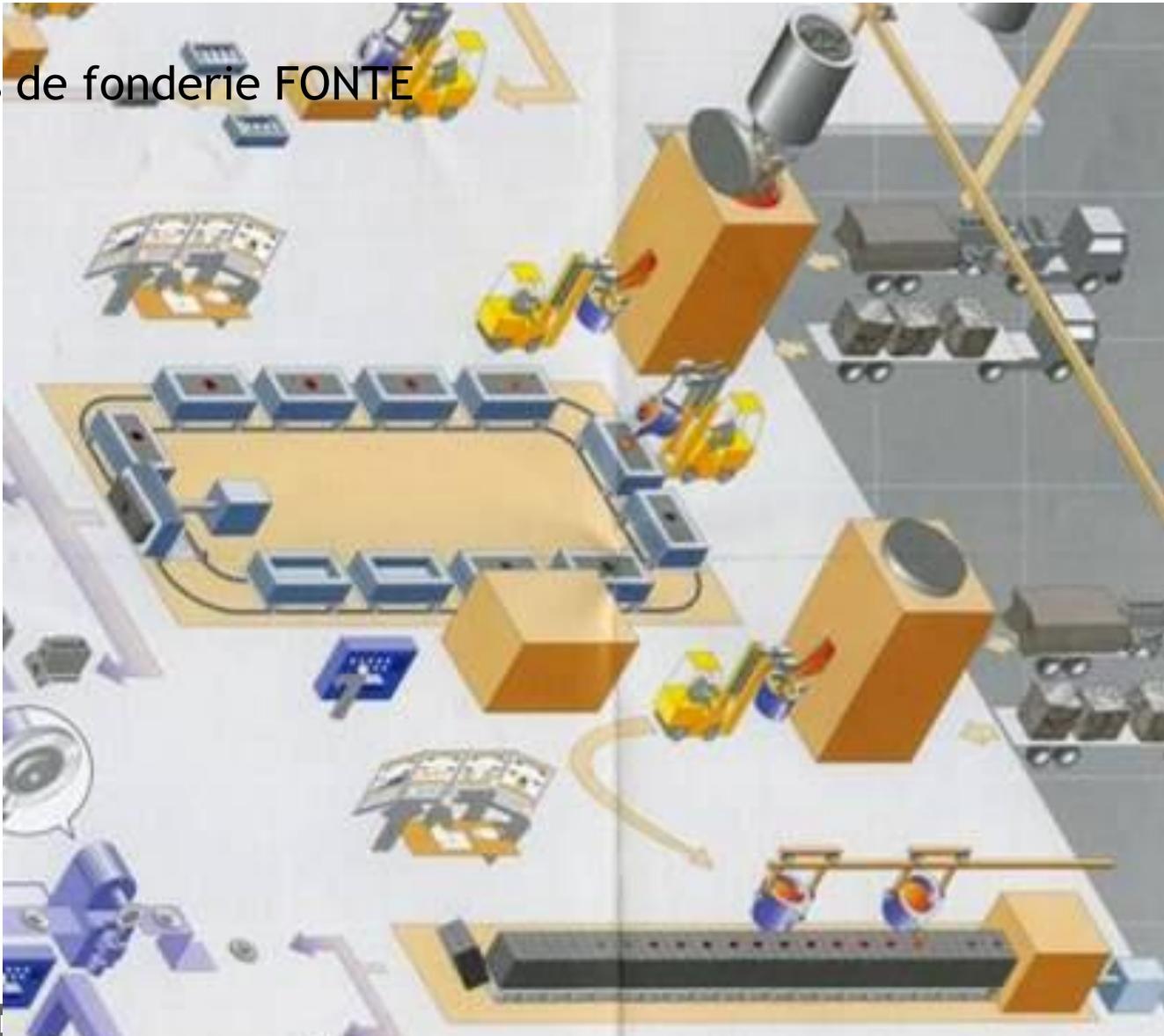


Elle nécessite des moyens assez lourds

Fonderie sable

Installations de fonderie FONTE

Joint de coulée horizontal



Joint de coulée vertical

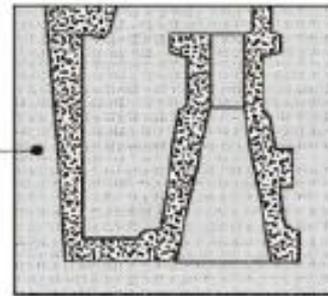
Fonderie sable

Un autre moyen de préparer le moule est de verser du sable autour d'un modèle en polystyrène. Ce dernier est instantanément vaporisé lors de la coulée de l'alliage. C'est le « lost foam »

Il s'agit d'un moulage en moule **non permanent** avec **modèle non permanent**

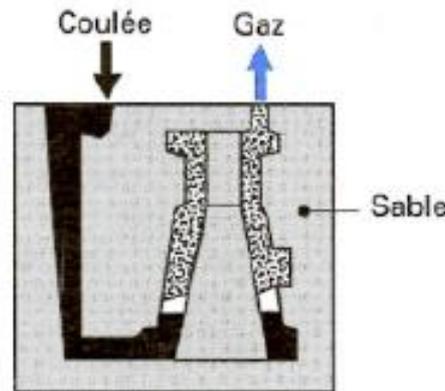


(a) modèle gazéifiable

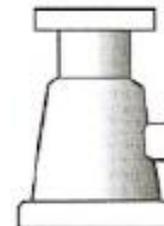


Châssis unique. Pas de noyau

(b) moule



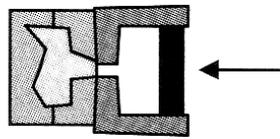
Le modèle se gazéifie au fur et à mesure que le métal liquide monte dans le moule



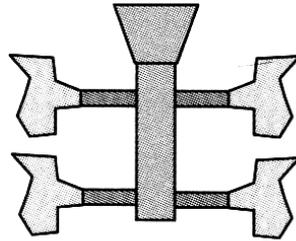
D'après Techniques de l'Ingénieur

# Fonderie sable

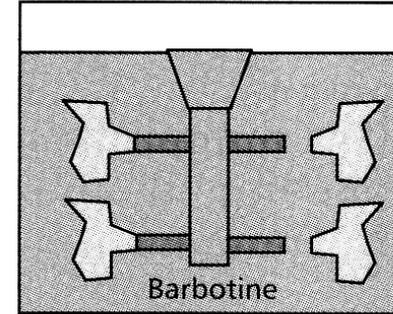
Les modèles en lost foam peuvent être collés entre eux sur une grappe



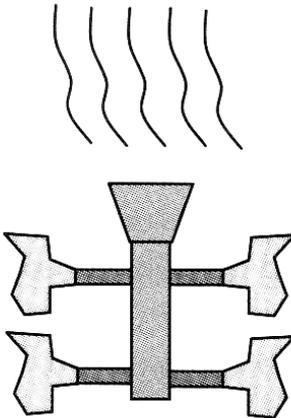
Injection du modèle



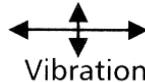
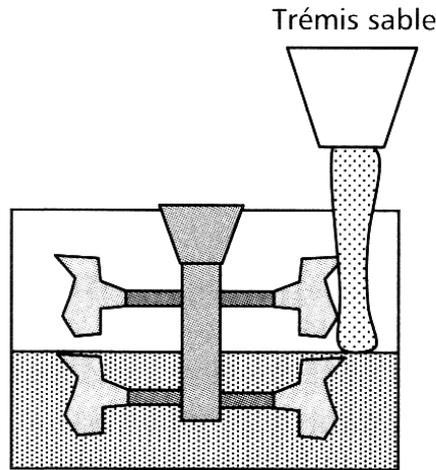
Fabrication de la grappe



Enduction de la grappe

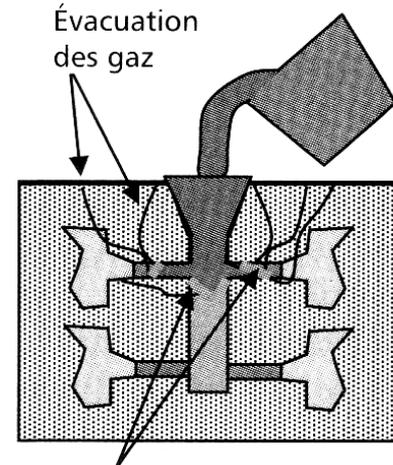


Séchage de l'enduit



Vibration

Moulage en sable



Évacuation des gaz

Front de gazéification

D'après  
Techniques de l'Ingénieur

Exemple de modèle lost foam et la pièce obtenue



D'après  
Techniques de l'Ingénieur

## Fonderie sable

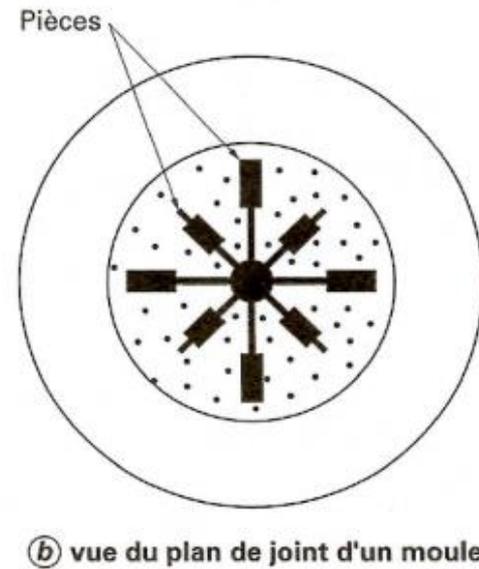
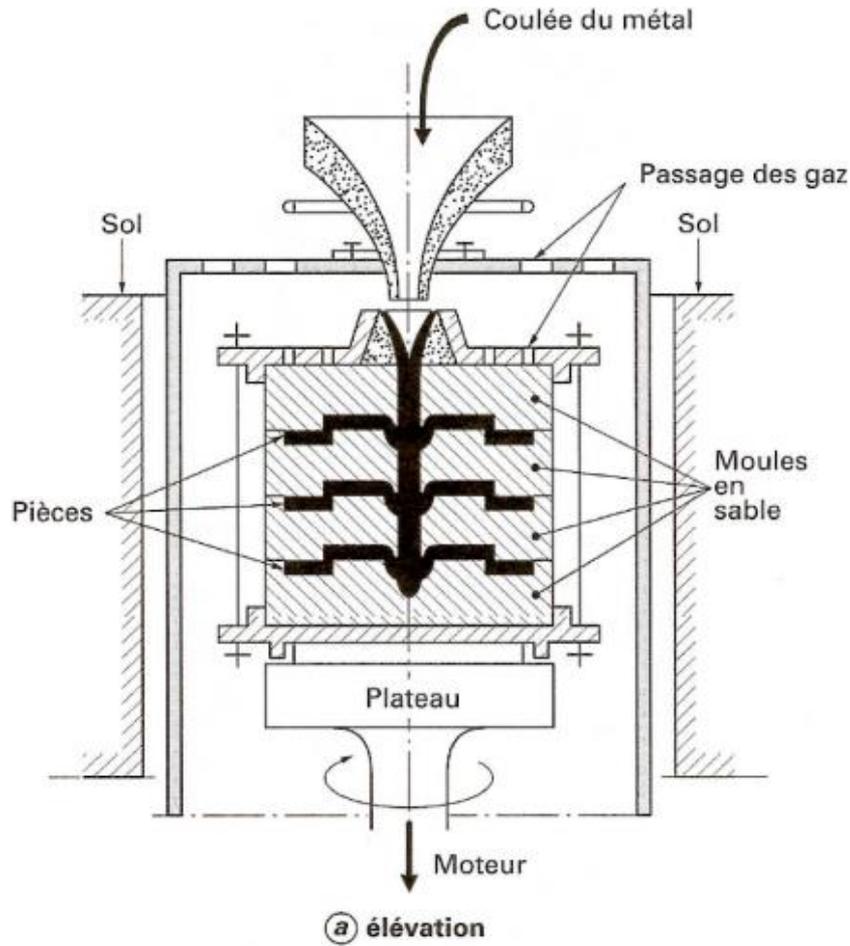
Exemples de modèles lost foam obtenus par assemblage



D'après  
Techniques de l'Ingénieur

# Fonderie sable

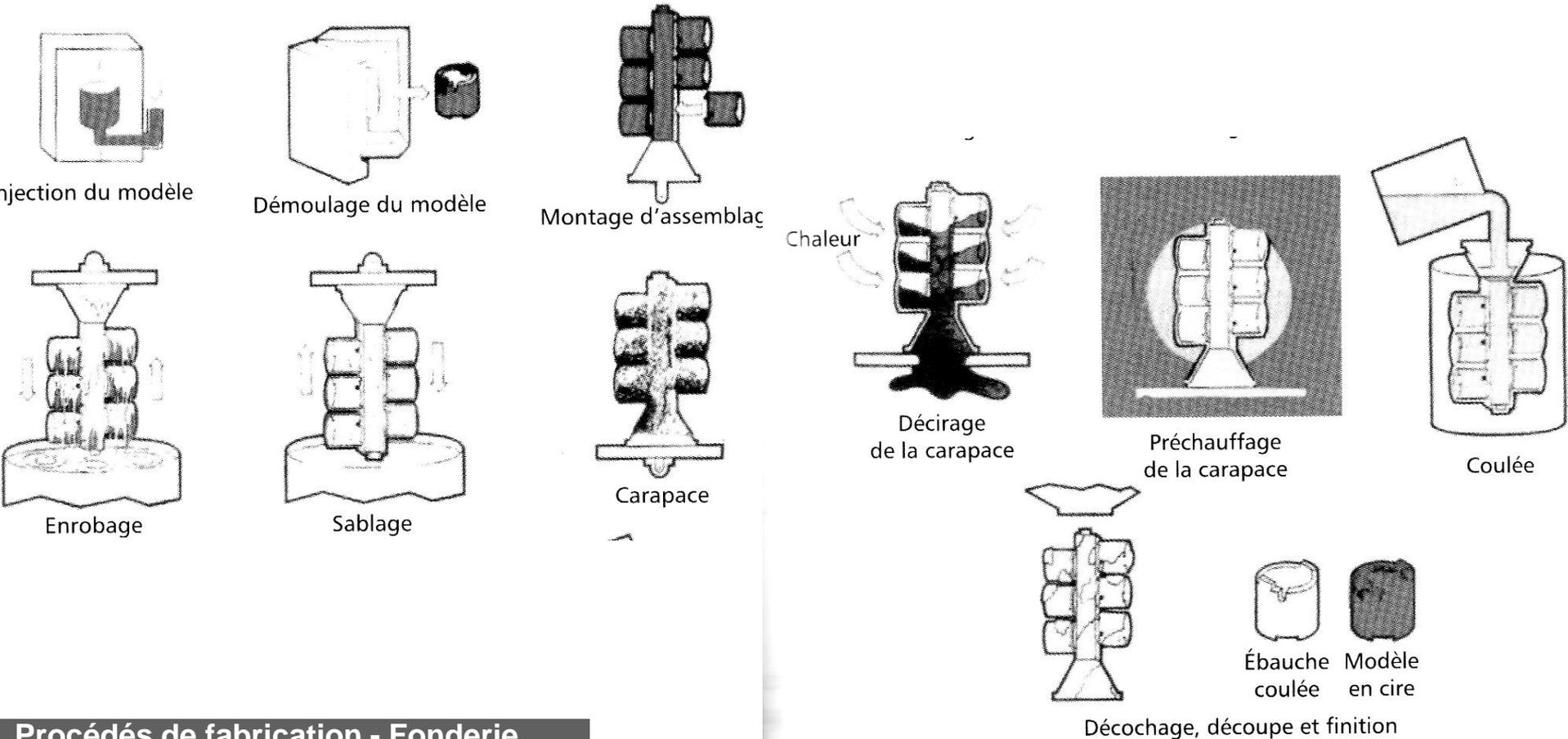
La coulée centrifuge permet d'augmenter la compacité du matériau



D'après  
Techniques de l'Ingénieur

# Fonderie cire perdue

La fonderie cire perdue est également un moulage en moule non permanent avec modèle non permanent. Le modèle est en cire et le moule constitué d'une carapace réfractaire (sorte de plâtre aggloméré autour du modèle).



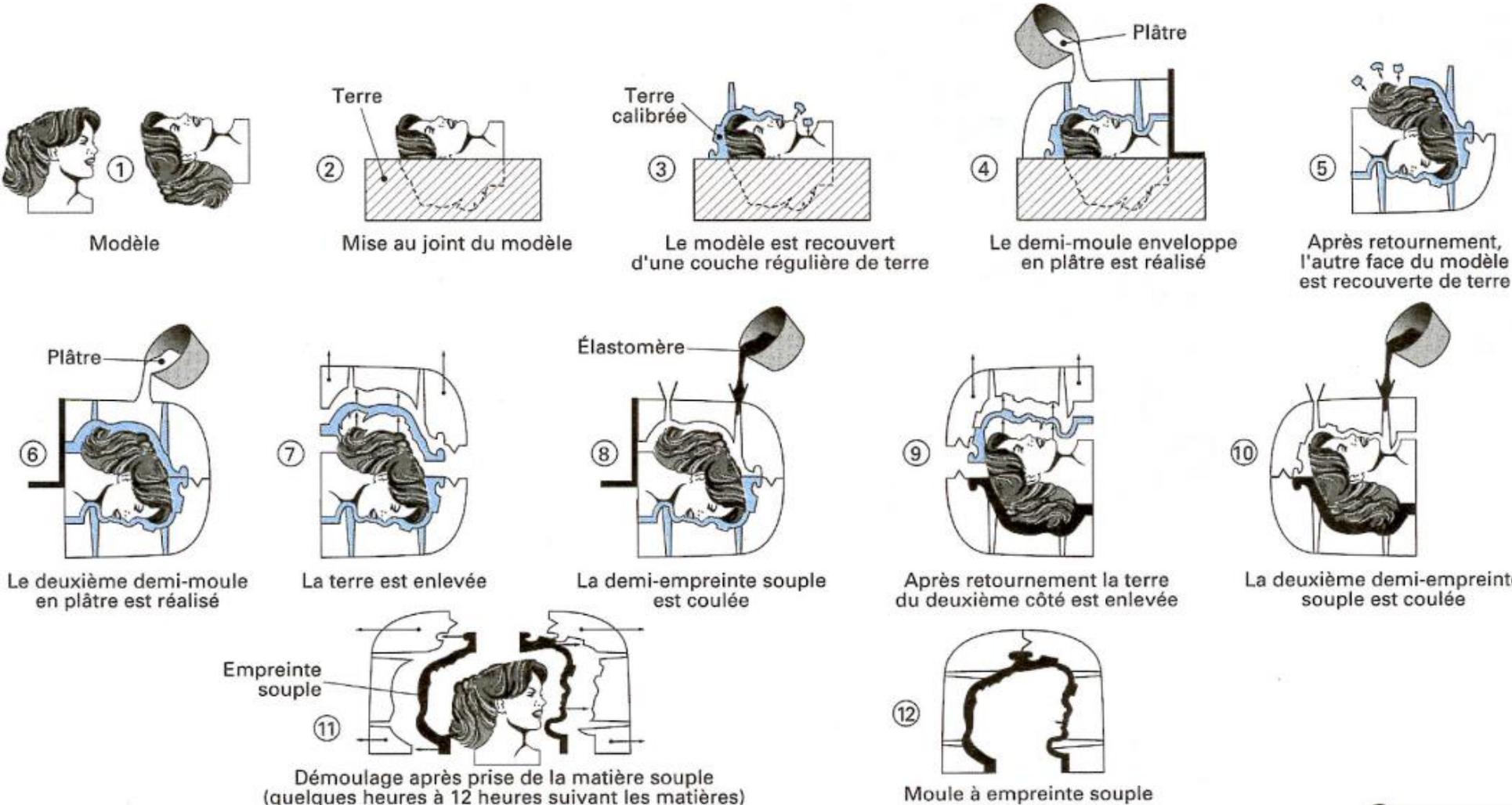
Fonderie cire perdue

La cire perdue est souvent utilisée en fonderie d'art



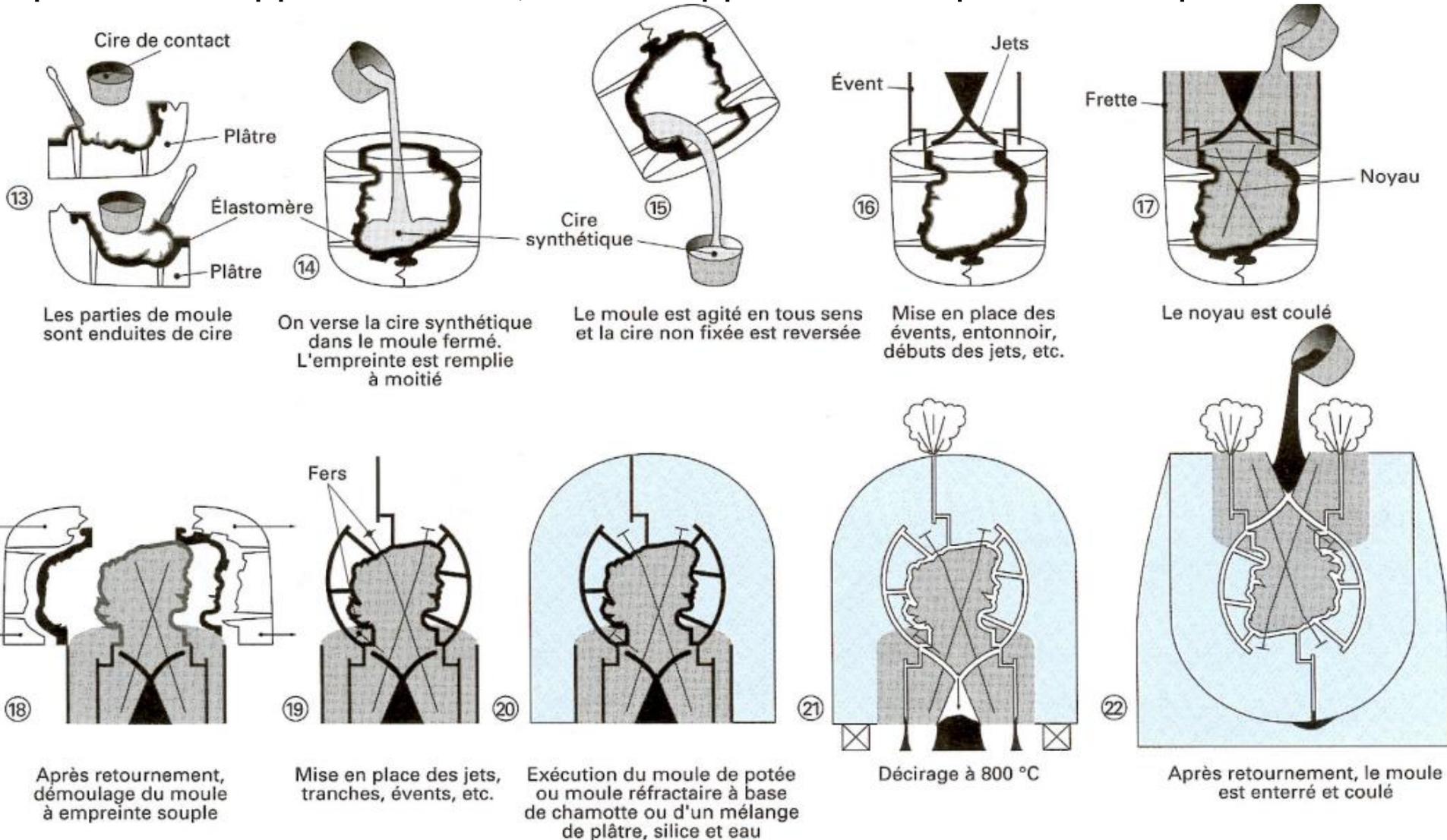
# Fonderie cire perdue

Pour des pièces plus complexes, il peut être nécessaire d'effectuer des opérations supplémentaires, faisant appel à des empreintes souples



# Fonderie cire perdue

Pour des pièces plus complexes, il peut être nécessaire d'effectuer des opérations supplémentaires, faisant appel à des empreintes souples

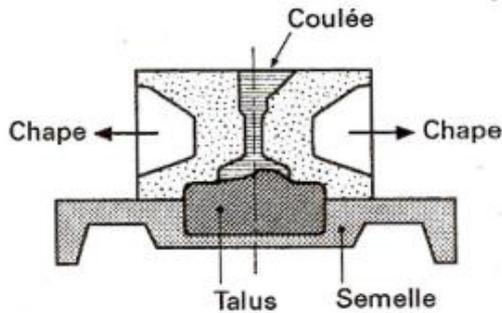


# Fonderie en coquille

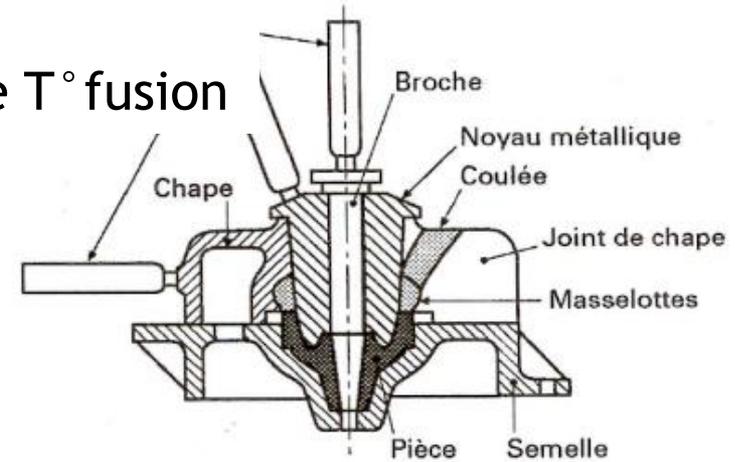
## Moulage en moule permanent

Le moule peut être plus complexe,

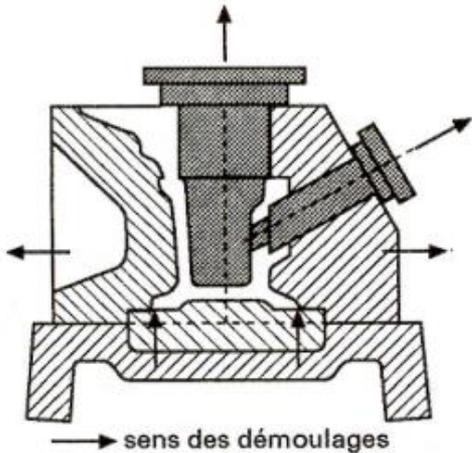
Les pièces sont dans des matériaux à faible  $T^{\circ}$  fusion



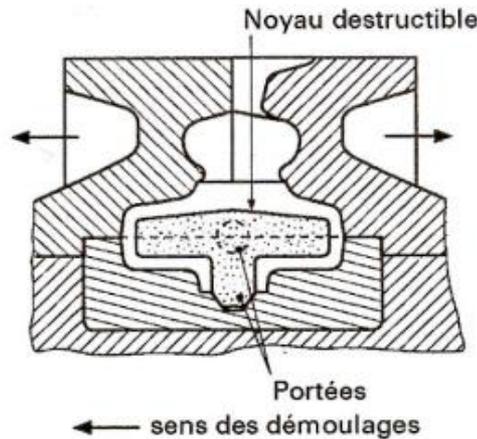
(a) différents éléments constitutifs d'une coquille



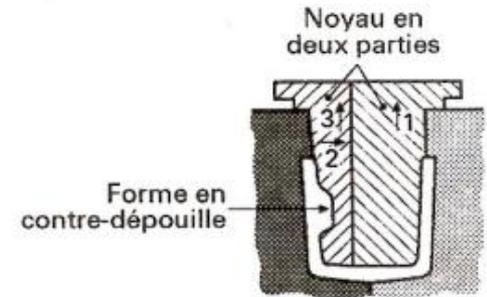
(b) petite coquille pour moulage manuel par gravité avec noyau métallique



(c) moulage en coquille avec noyau métallique et broche extractible



(d) moulage en coquille avec noyau sable

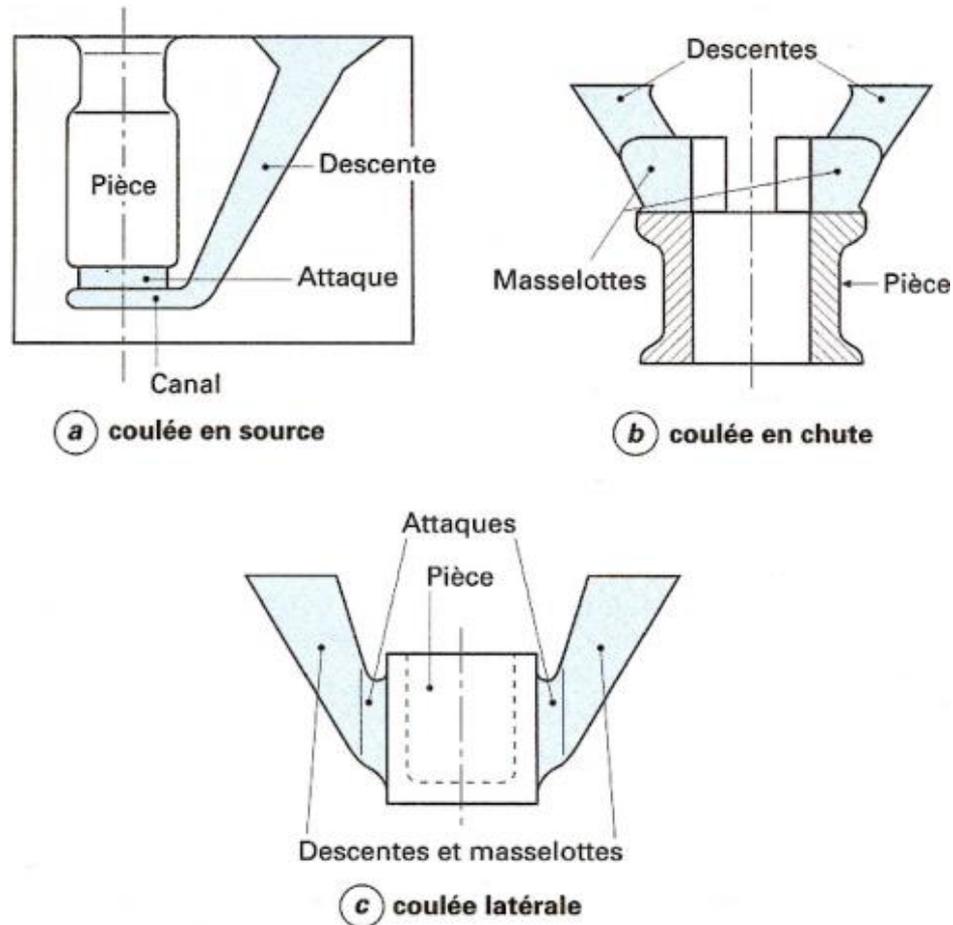


1, 2, 3 : ordre de démoulage des noyaux  
(e) coquille avec noyau en deux parties (fabrication de pistons par exemple)

# Fonderie en coquille

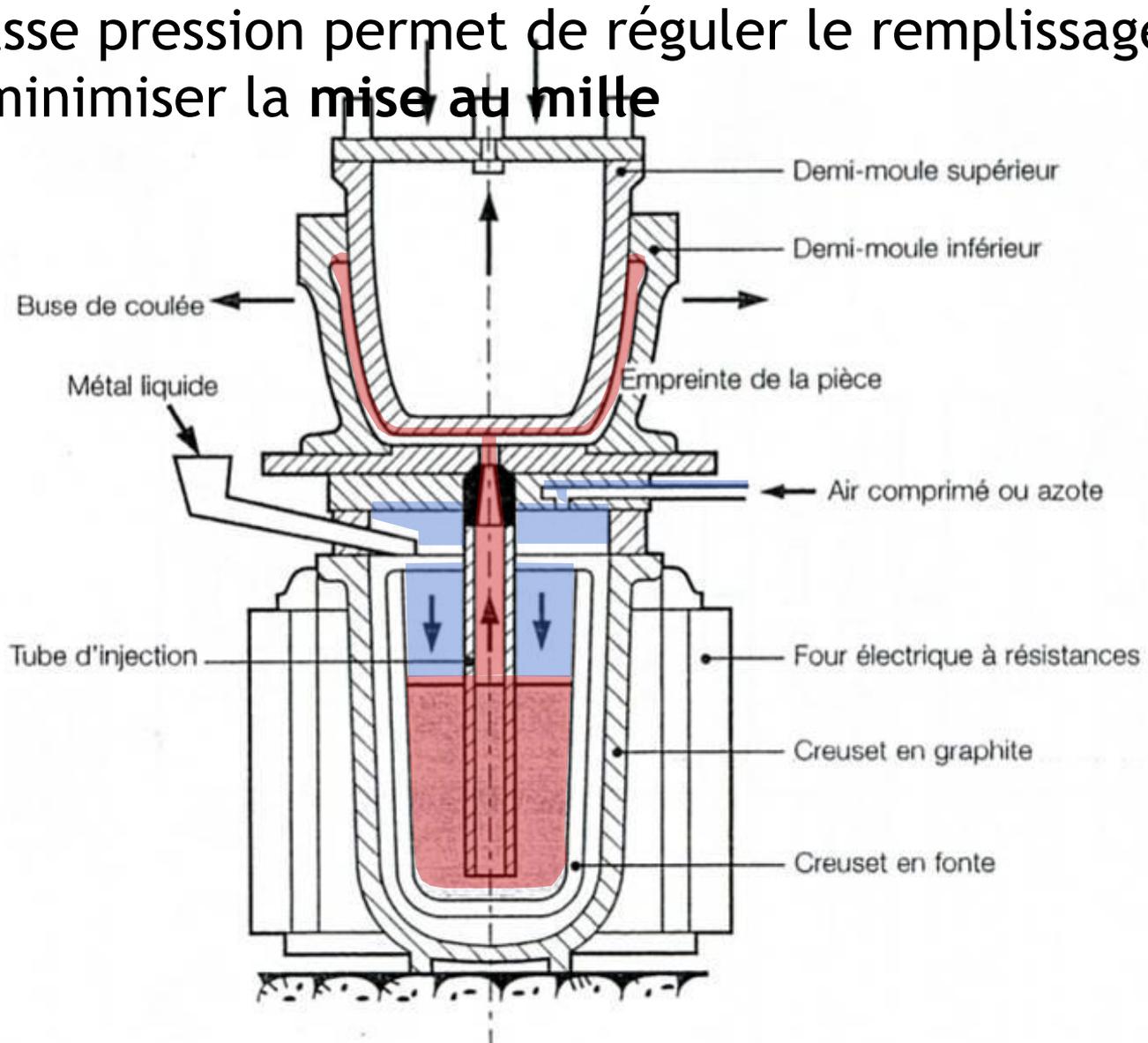
Le moulage en coquille pose les même problématiques que le moulage au sable (système d'attaque, remplissage, masselottage)

D'après  
Techniques de l'Ingénieur



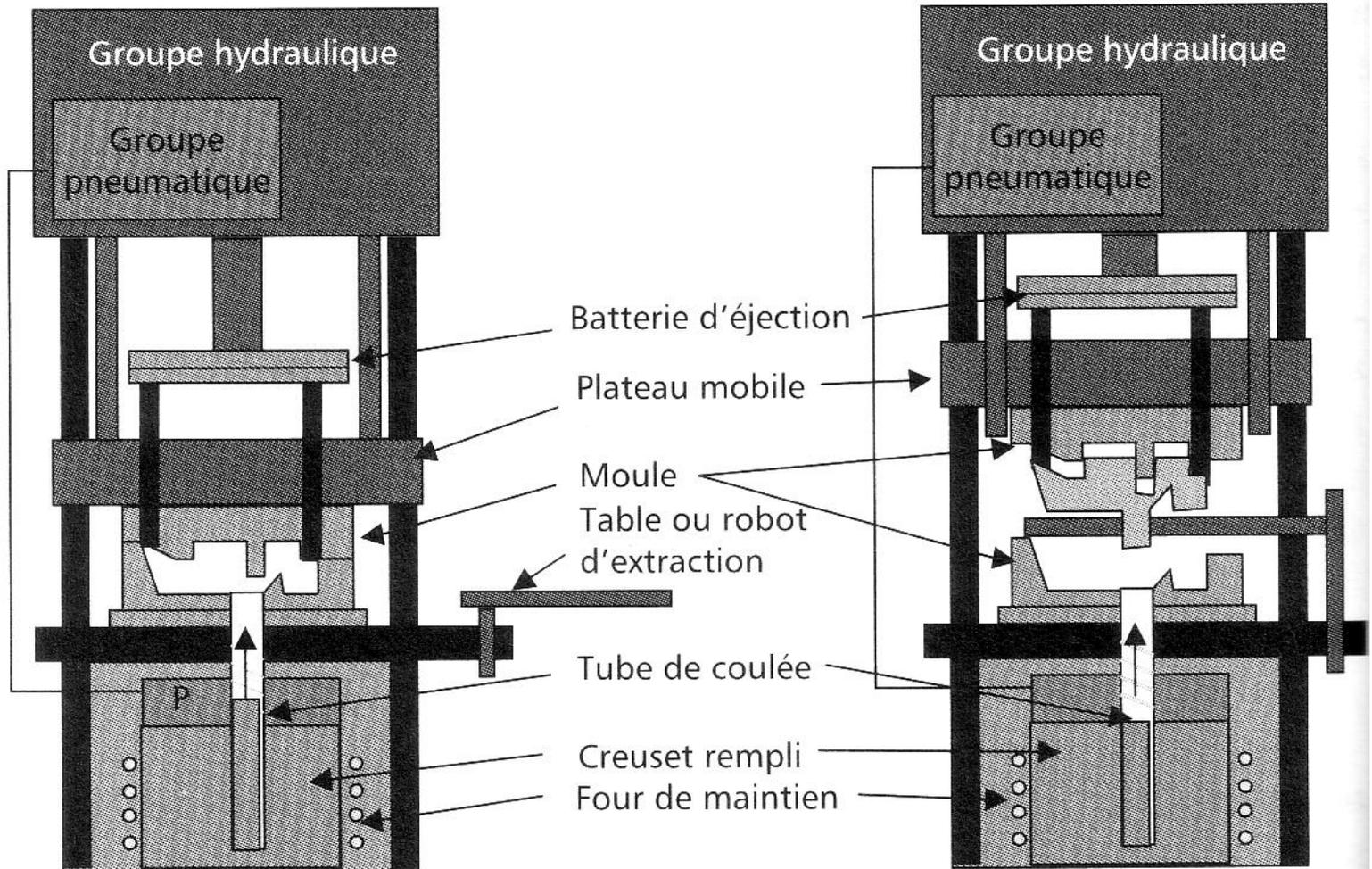
# Injection basse pression

L'injection basse pression permet de réguler le remplissage du moule et de minimiser la **mise au mille**



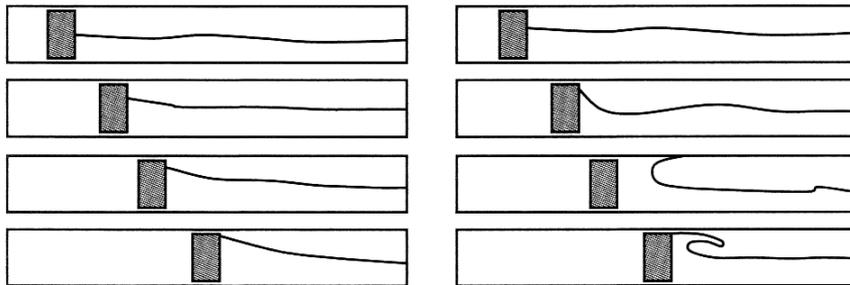
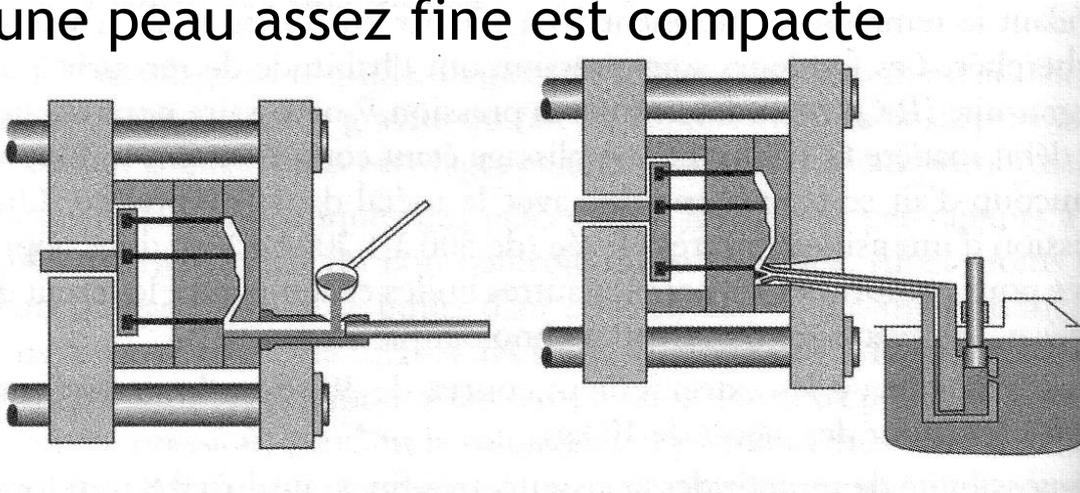
# Injection basse pression

L'injection basse pression permet de réguler le remplissage du moule et de minimiser la mise au mile



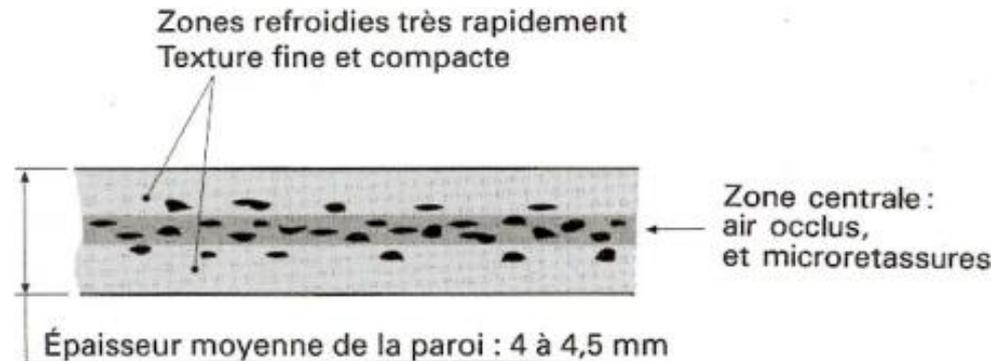
# Injection haute pression

L'injection haute pression engendre des vitesses importantes (Reynolds important), et donc des porosités. Seule une peau assez fine est compacte



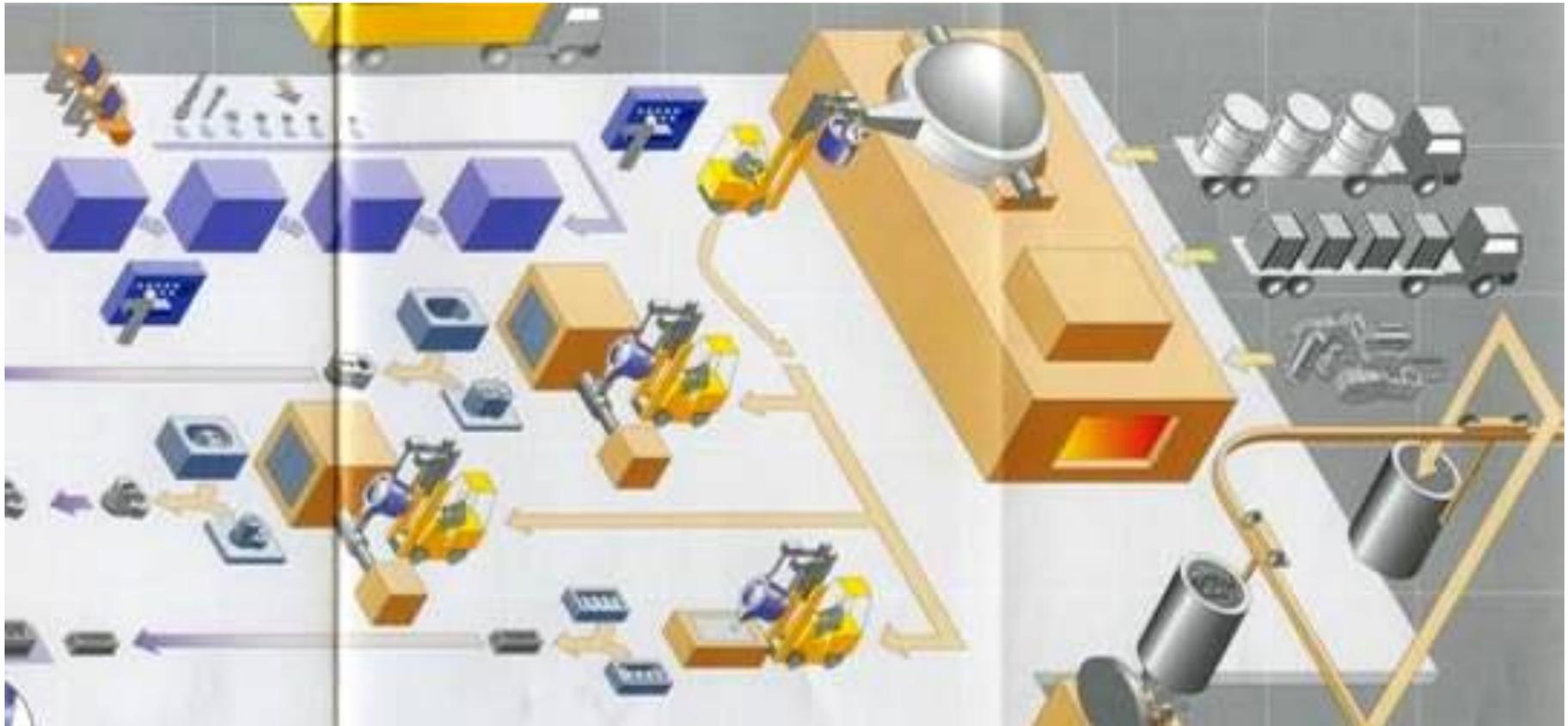
Bon contrôle de l'accélération du piston

Mauvais contrôle du mouvement du piston



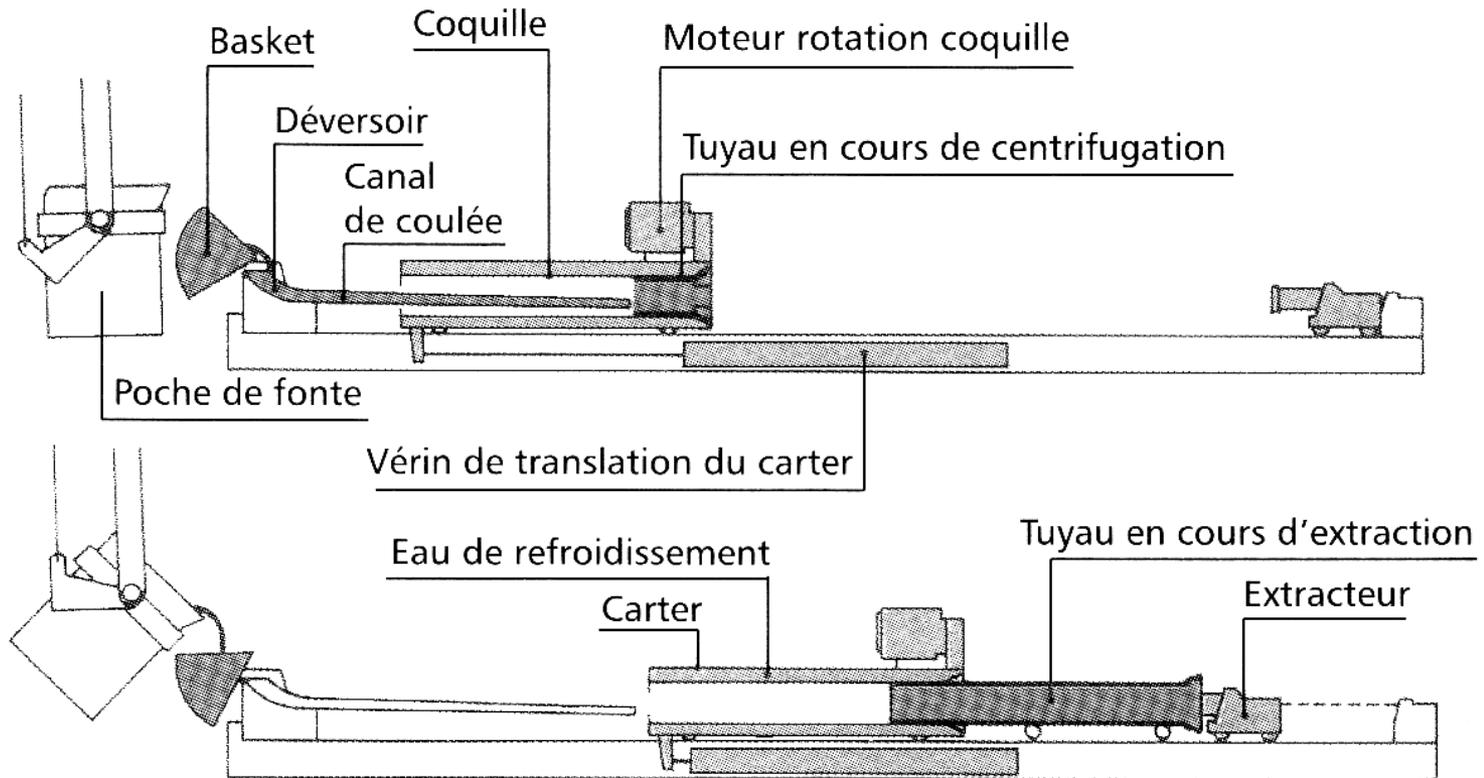
# Injection basse/haute pression

## Installations de fonderie ALU



# Fonderie centrifuge en moule permanent

La fonderie centrifuge en moule permanent est principalement destinée aux pièces de révolution

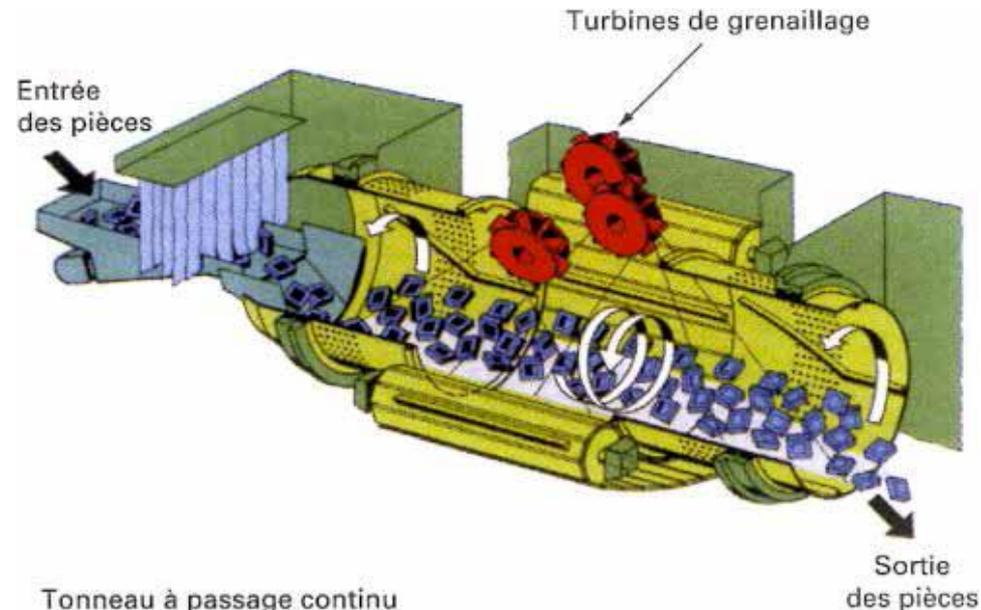


D'après  
Techniques de l'Ingénieur

## Finition - parachèvement

La première étape suivant la solidification est l'enlèvement du sable :

- Les pièces peuvent être vibrées ou secouées entre elles dans des tonneaux de décochage
- Le sablage – grenailage permet également d'enlever des résidus



Tonneau à passage continu  
 Capacité : 12 t / h  
 Masse unitaire des pièces : 150 kg (max.)  
 Débit de grenaille des trois turbines : 3 x 600 kg / min

## *Finition - parachèvement*

Après l'élimination du sable, il est nécessaire d'enlever les masselottes et le système d'alimentation :

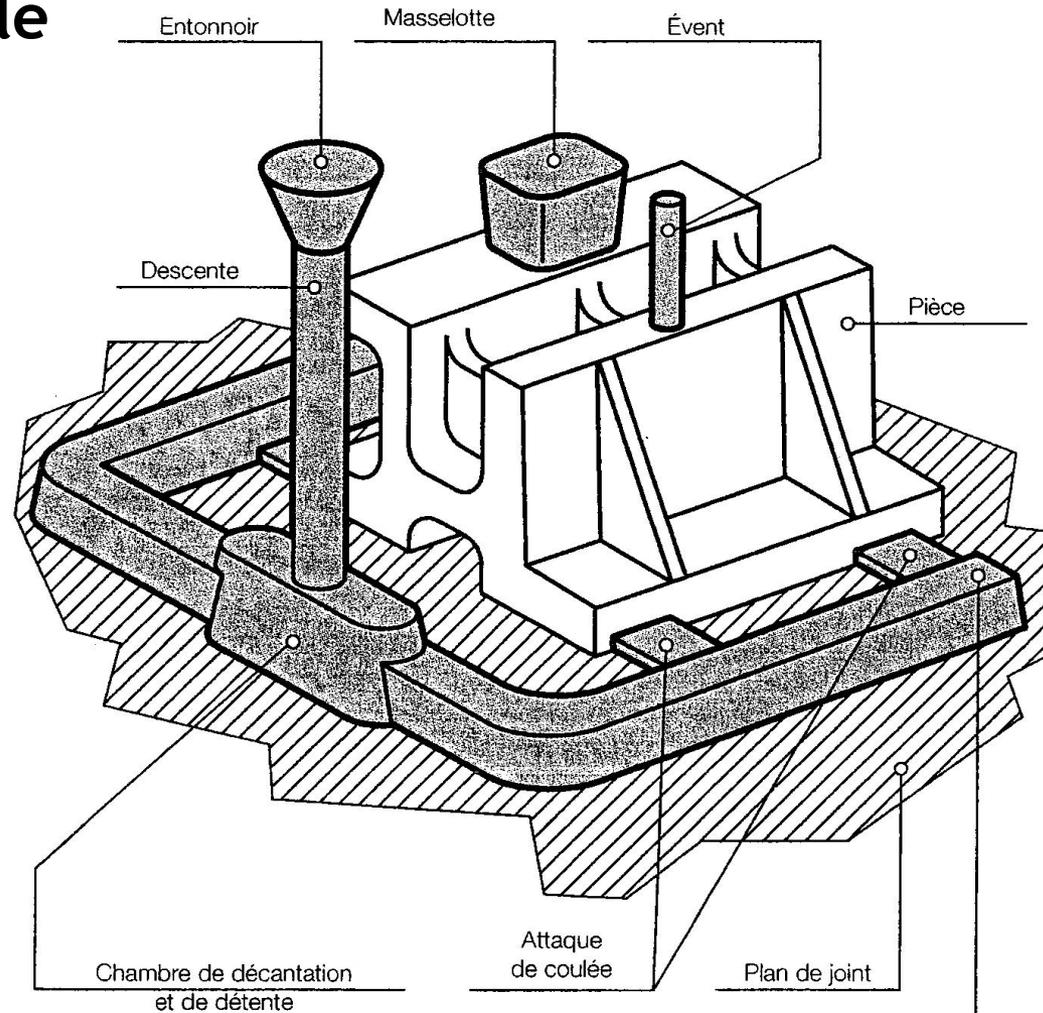
- Masse
- Scie à ruban
- Tronçonneuse
- Coin hydraulique

Les plans de joint et d'autres bavures peuvent également être éliminées

- marteaux et burins
- tourets à meuler ou meuleuses portatives
- tonneaux de roulage
- gougeage

Approche fonctionnelle du moule

Les éléments du moule



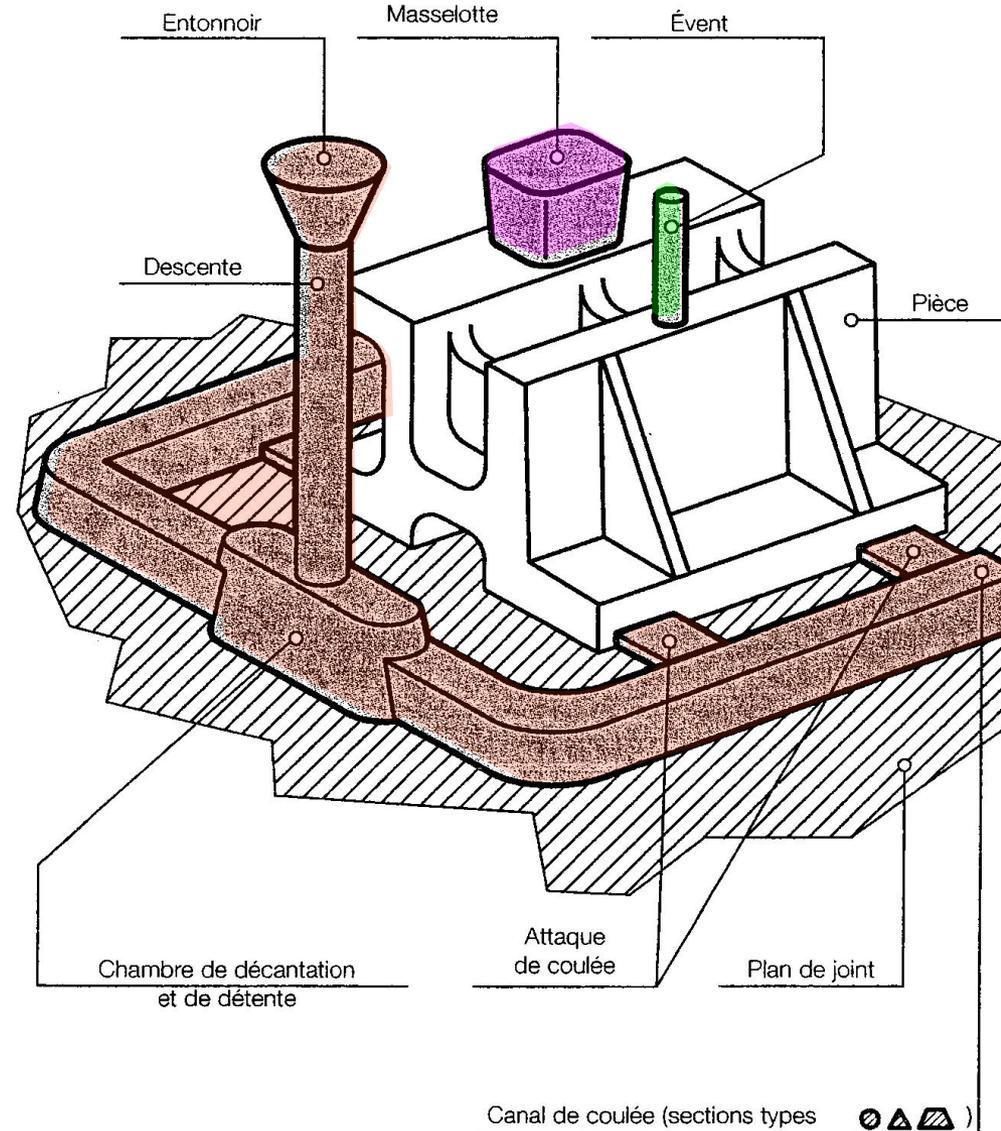
# Approche fonctionnelle du moule

**Système d'attaque :**  
Remplissage de l'empreinte sans turbulences et sans entraîner d'impuretés dans un temps donné

**Masselotte :**  
Réservoir d'alliage compensant le retrait de la pièce

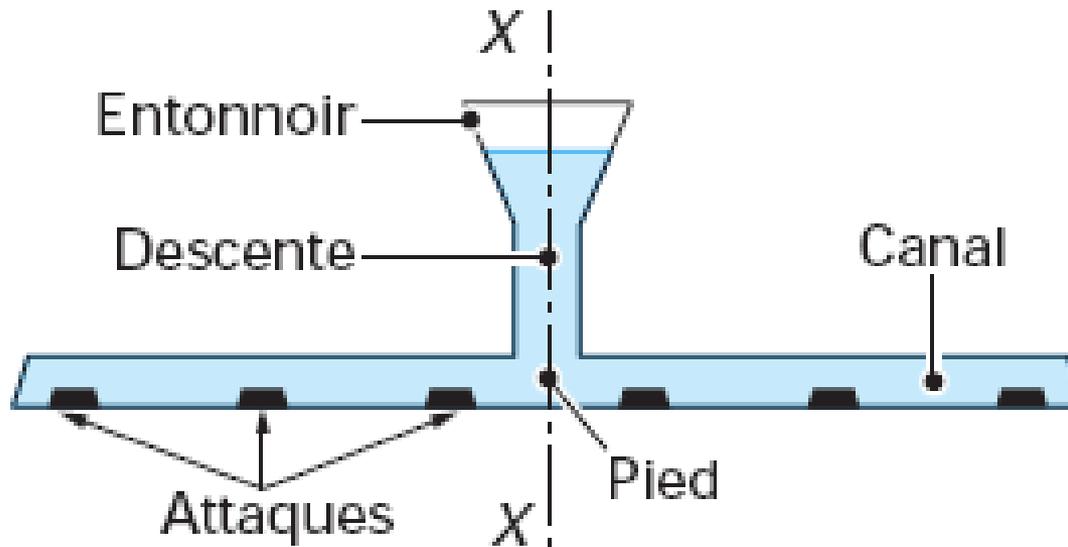
**Évents :**  
Évacuation des gaz présents ou pouvant se former pendant la coulée

**Chambre de décantation :**  
Élimination des premières parties de l'alliage contaminées ou oxydées



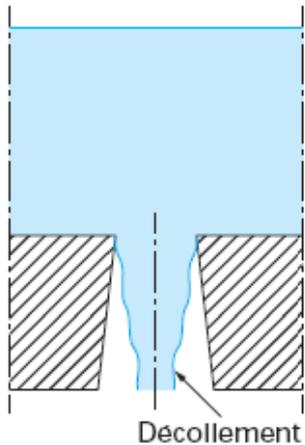
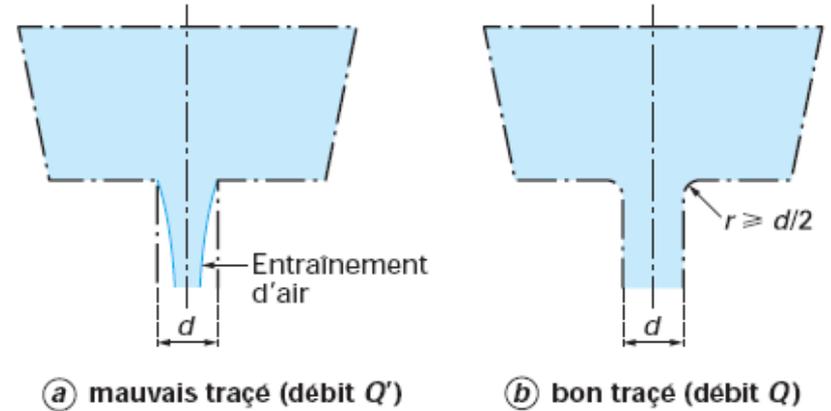
## *Écoulement du liquide en fonderie*

Lors de la coulée par gravité, le remplissage doit être le plus calme (pas de turbulences) et le plus homogène possible

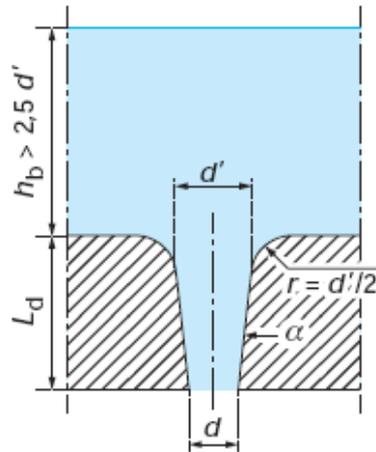


# Écoulement du liquide en fonderie

Le canal de descente doit permettre un écoulement laminaire de l'alliage, sans turbulences ni entraînement d'air

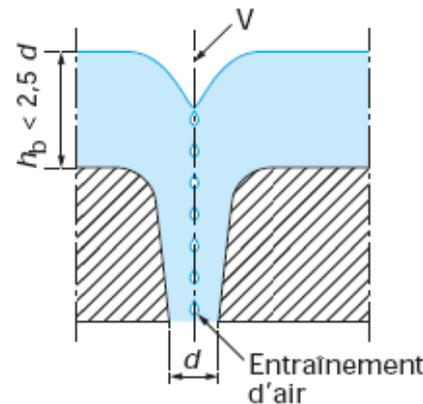


(a) mauvais tracé :  
décollement  
des filets fluides et  
entraînement d'air



(b) bon tracé :  
 $\alpha = 10\%$  pour  $L_d \leq 0,05\text{ m}$   
 $\alpha = 5\%$  pour  $0,05\text{ m} < L_d < 0,15\text{ m}$

$L_d$  longueur développée de la descente

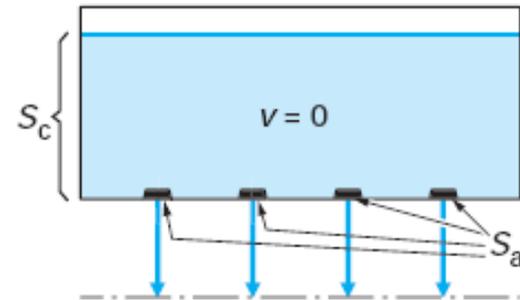
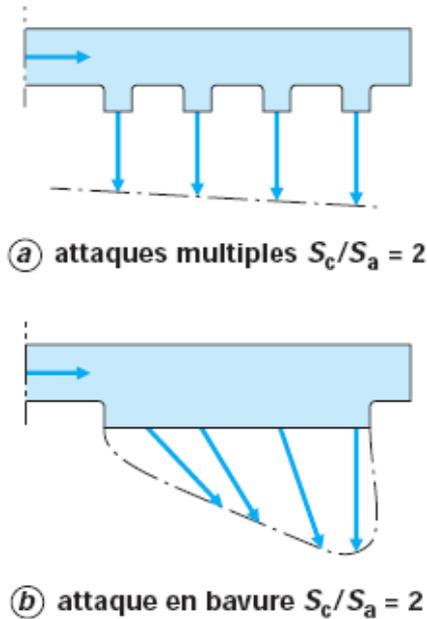


(c) mauvais tracé :  
création d'un vortex V  
et entraînement d'air

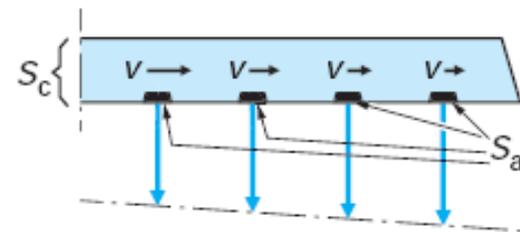
$r \leq 2/3 Q$

# Écoulement du liquide en fonderie

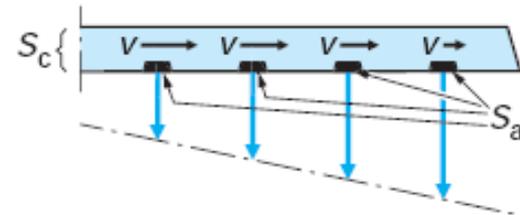
Les attaques doivent permettre une alimentation équilibrée des différentes parties du moule



(a) équilibre parfait  $S_c/S_a = \infty$



(b) faible équilibre  $S_c/S_a \geq 2$

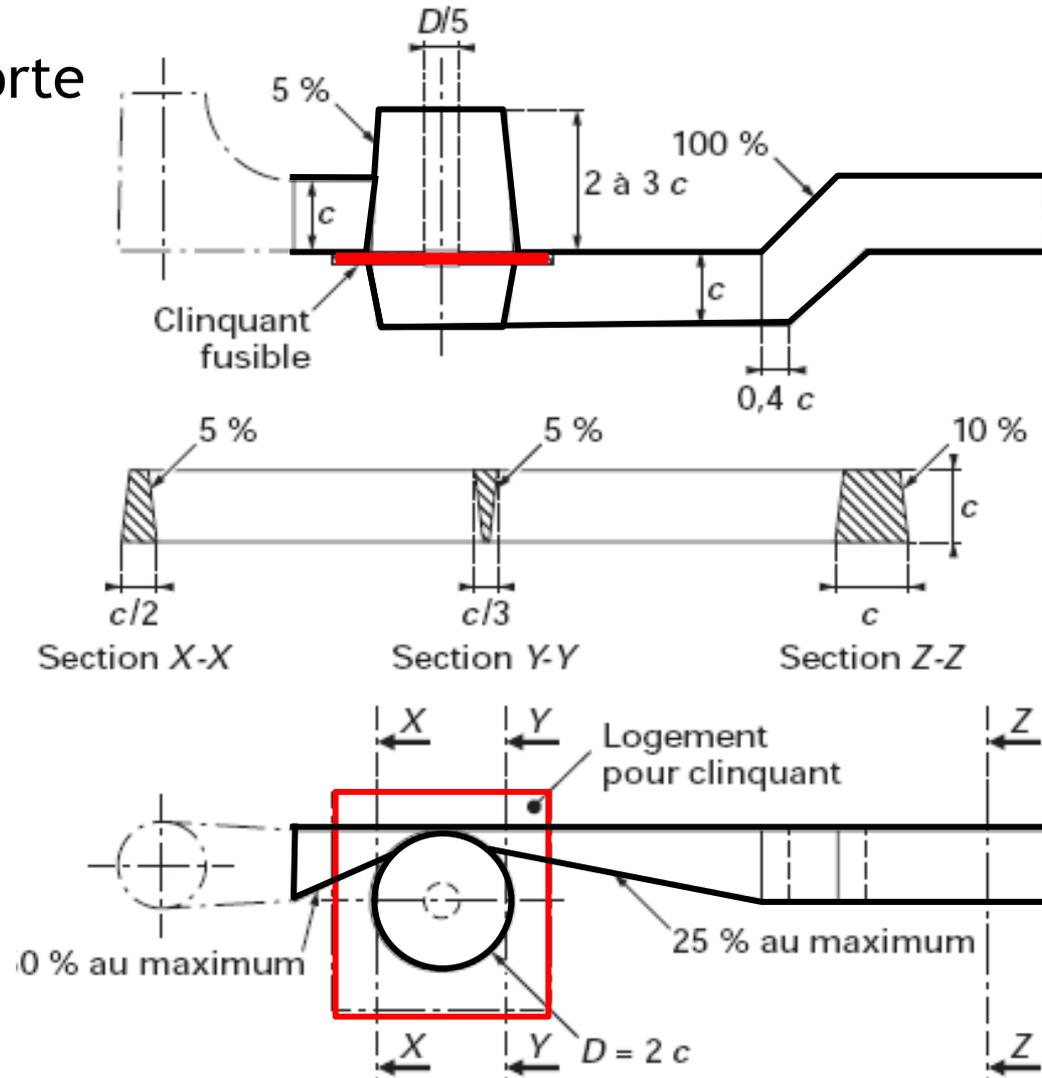


(c) fort déséquilibre  $S_c/S_a = 2/3$

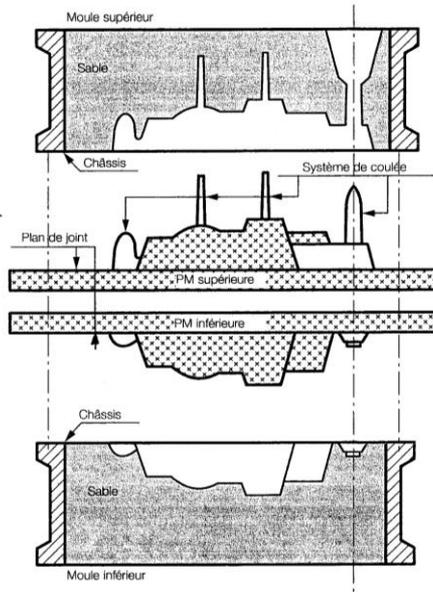


# Écoulement du liquide en fonderie

Le système d'alimentation comporte des équipements de rétention des crasses dans le système d'alimentation



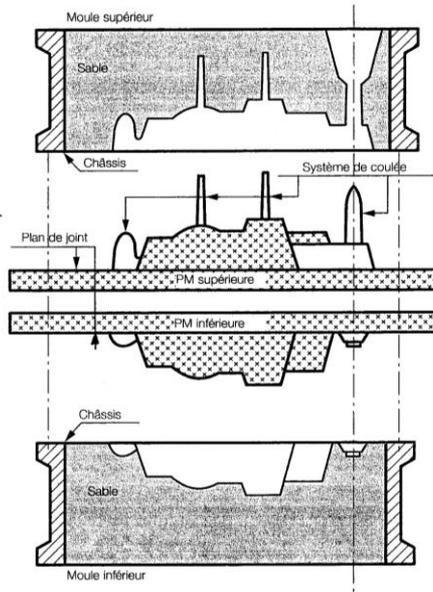
# Possibilités et limites en fonderie



Nécessité de retirer le modèle / la pièce  
 → Les pièces de fonderie présentent des dépuilles

Type de modèle	Dépouille admissible (%)
Modèle « sans dépouille »	<u>0,2 à 0,5 %</u>
Modèle avec dépouille minimum	<u>1 %</u>
Modèle avec dépouille normale	<u>2 %</u>

# Possibilités et limites en fonderie



Cette dépouille dépend des dimensions des pièces

Profondeur de la pièce (mm)	Dépouille associée
5	4 %
10	5 %
15	4 %
20	3,5 %
25 et au delà	3,2 %

Possibilités et limites en fonderie

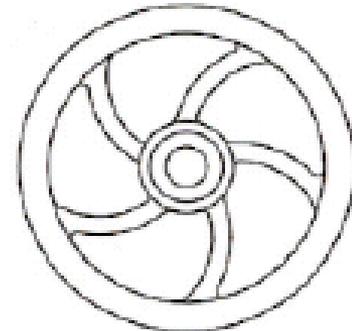
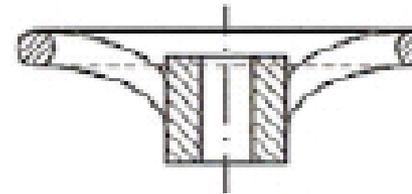
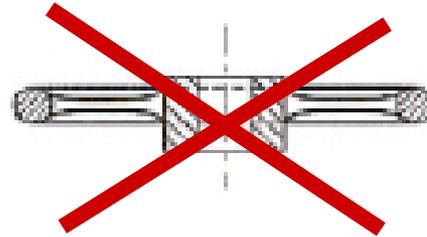
Retrait

Matériau	Retrait
Fontes	8 à 18 ‰
Aciers	15 à 22 ‰
Alliages légers	12 à 15 ‰
Alliages cuivreux	12 à 18 ‰

→ Masselottage

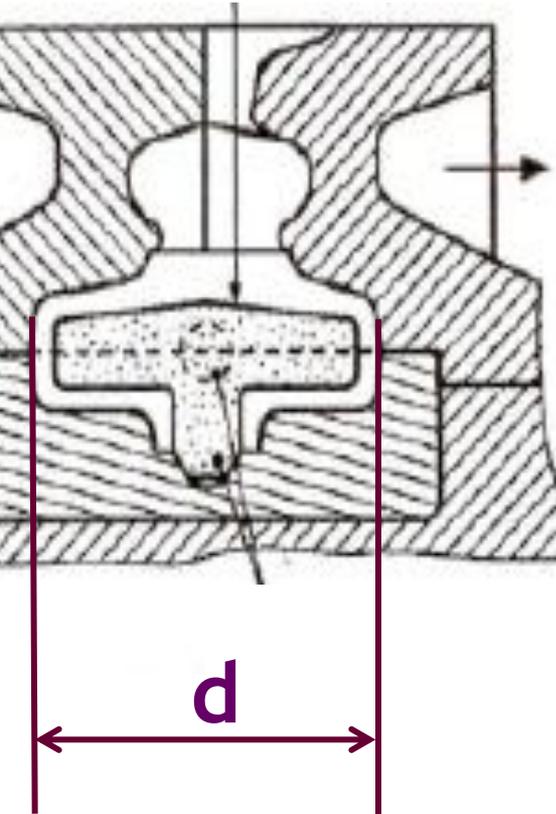
→ Donner des degrés de liberté

→ Tolérances dimensionnelles



Possibilités et limites en fonderie

→ Surépaisseurs d'usinage



Cotes de référence	Plus grande dimension de la pièce		
	250	250 - 1000	1000 et au-delà
	<b>Tolérance dimensionnelle</b>		
0 - 40	2	2	4
40 - 65	2	2	5
65 - 100	2	3	6
100 - 160	3	3	6
160 - 250	4	4	6
250 - 400	'	'	-
400 - 630		6	8
630 - 1000		7	10
1000 - 1800			13
1800 - 2500			16

# Définition des pièces de fonderie

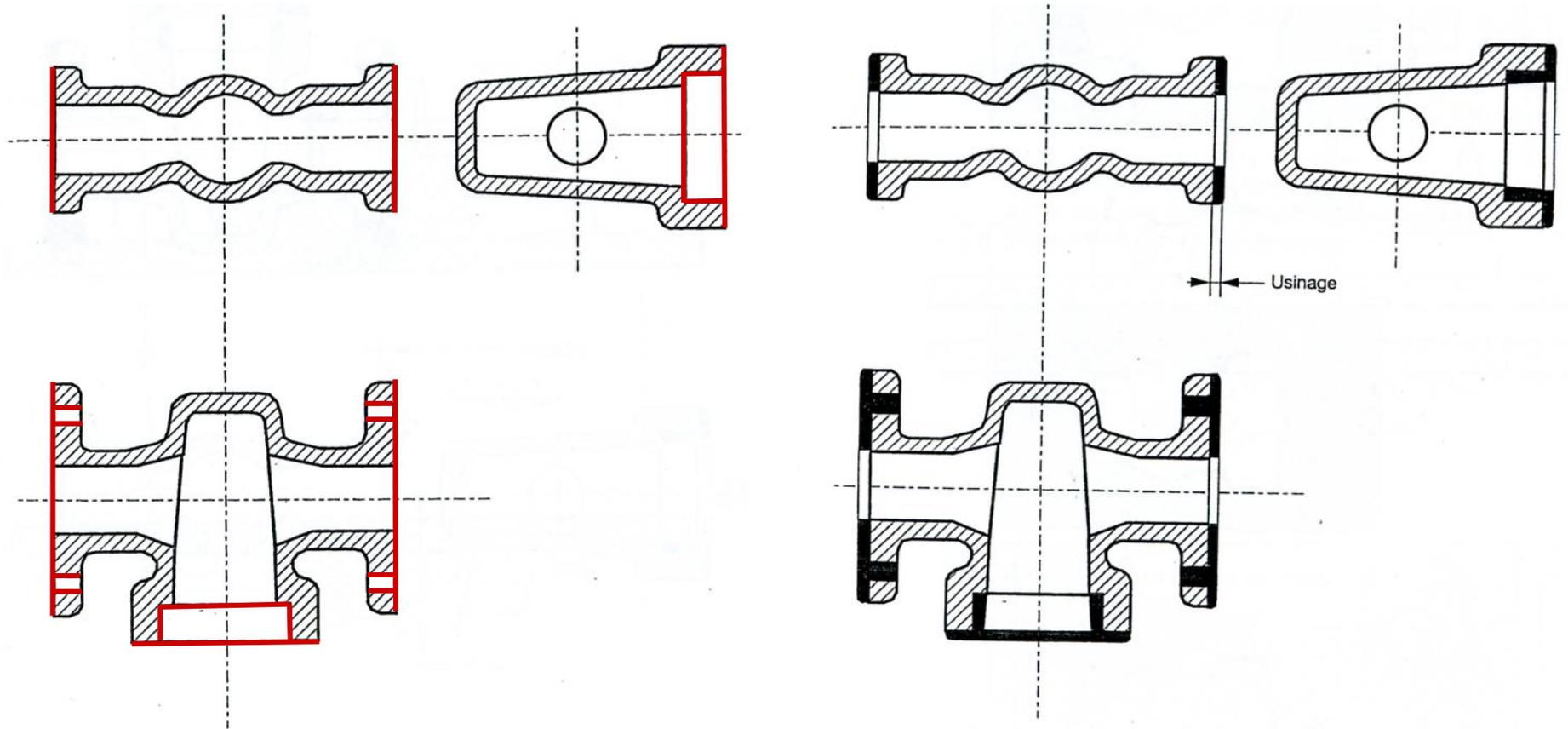
Pièce à obtenir



Surfaces à usiner

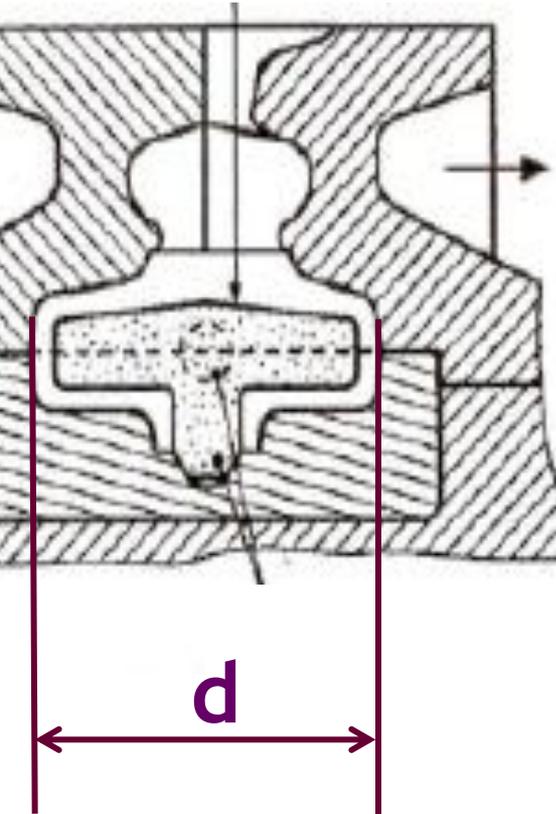


Surépaisseurs d'usinage



# Définition des pièces de fonderie

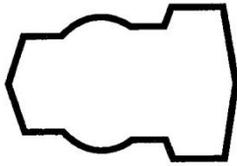
→ Surépaisseurs d'usinage



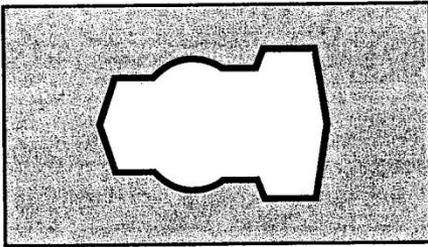
Cotes de référence	Plus grande dimension de la pièce					
	250	250 - 1000	1000 et au-delà	250	250 - 1000	1000 et au-delà
	Surépaisseur			Tolérance dimensionnelle		
0 - 40	6	6	8	2	2	4
40 - 65	6	6	7	2	2	5
65 - 100	6	7	10	2	3	6
100 - 160	7	7	10	3	3	6
160 - 250	8	8	10	4	4	6
250 - 400		9	11	'	'	-
400 - 630		10	12		6	8
630 - 1000		11	14		7	10
1000 - 1800			17			13
1800 - 2500			20			16

# Définition des pièces de fonderie

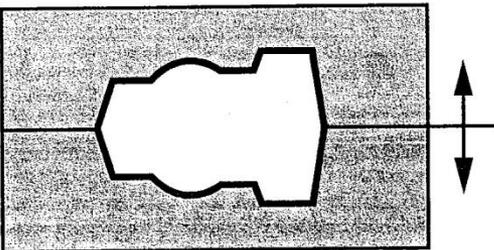
## → Définition du plan de joint



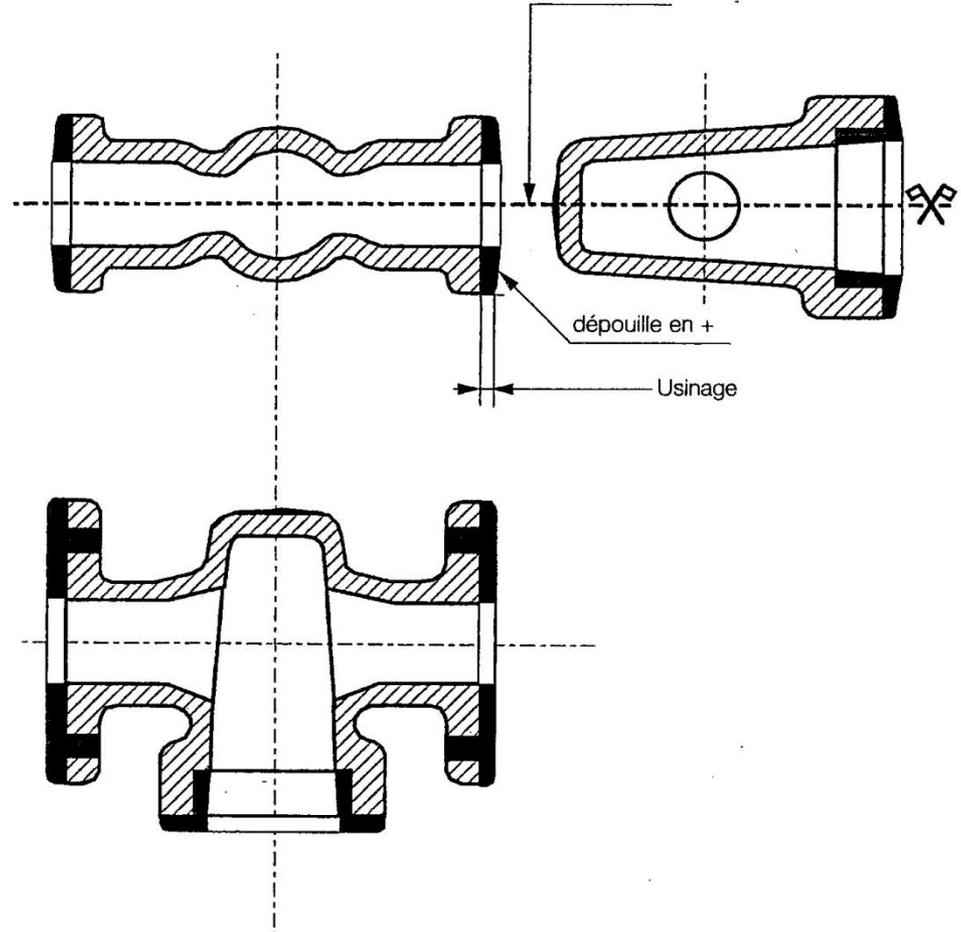
● Il faut un moule autour de cette pièce.



● Pour que le moule soit réalisable, il faut qu'il soit conçu en 2 parties minimum, d'où la notion de plan de joint.

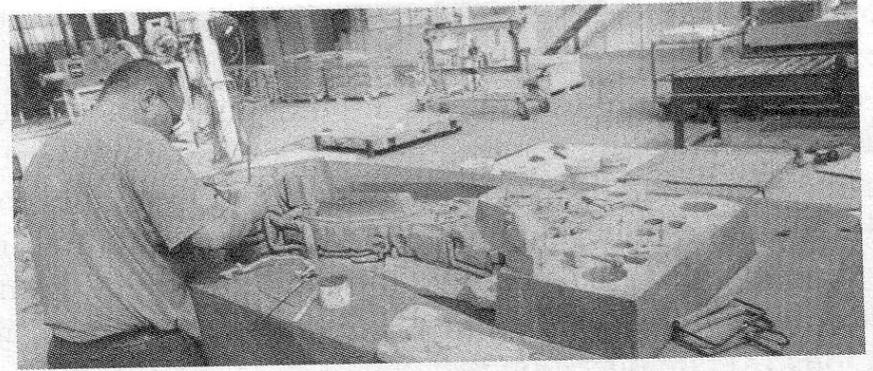
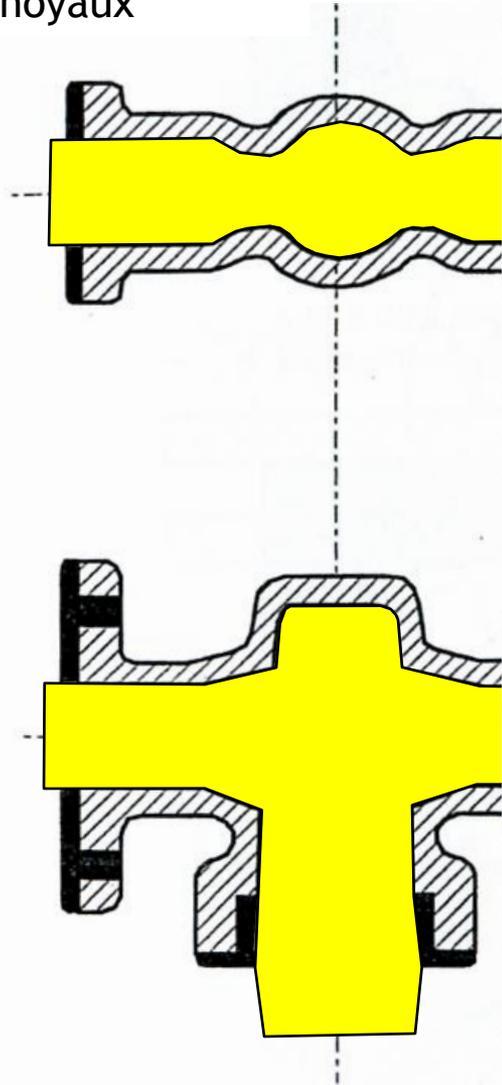


## → Définition des dépouilles

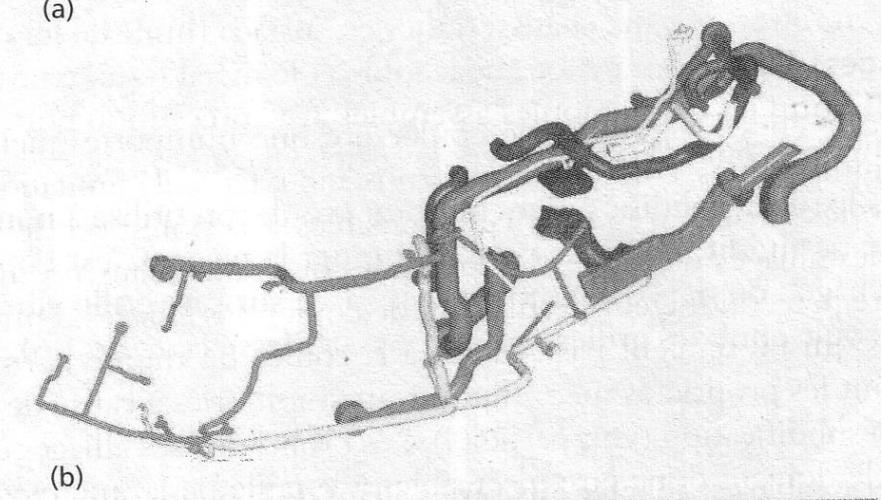


Définition des

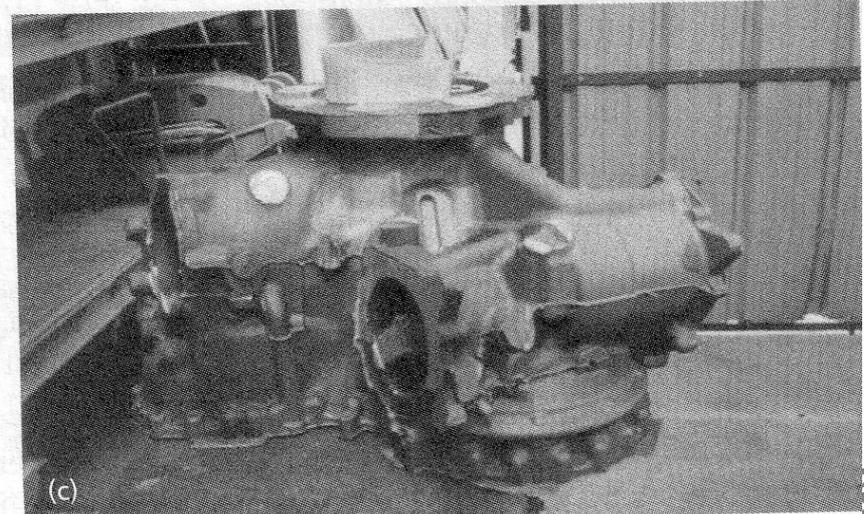
→ Définition des noyaux



(a)



(b)



(c)

## Règles générales - objectif

Obtenir :

- une compacité maximale de l'alliage ;
- des formes, des dimensions et des états de surface ;
- une structure métallurgique satisfaisant aux obligations structurelles (résistance mécanique, déformation).

## Définition des pièces de fonderie

Règle 1 : **limiter** le nombre de surfaces de joint du moule

Règle 2 : le plan de joint doit être le plus **simple** possible : plan, ou suite de plans

Règle 3 : surfaces demandant la qualité maximale placées dans la **partie inférieure** du moule

Règle 4 : empreinte contenue le plus possible dans une **même** partie du moule et favorisant une bonne régularité des épaisseurs et une bonne concentricité

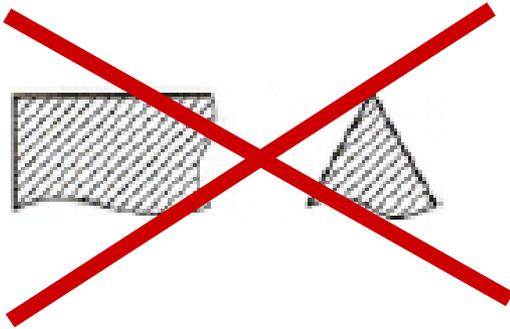
Règle 5 : **minimisation** du nombre de noyaux

Règle 6 : placer le plan de joint de manière à ce que les surfaces en **dépouille** choisies ne perturbent pas les fonctions de la pièce

## Définition des pièces de fonderie

Le traçage des pièces de fonderie

Pas d'angles sortants vifs au niveau desquels le refroidissement serait plus rapide que le reste de la pièce.



Mauvais

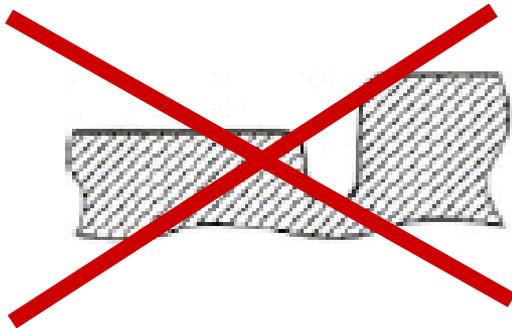


Correct

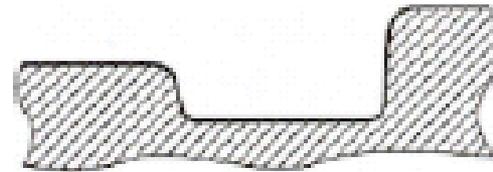
*Définition des pièces de fonderie*

Le traçage des pièces de fonderie

Pas d'angles rentrants trop marqués



Mauvais

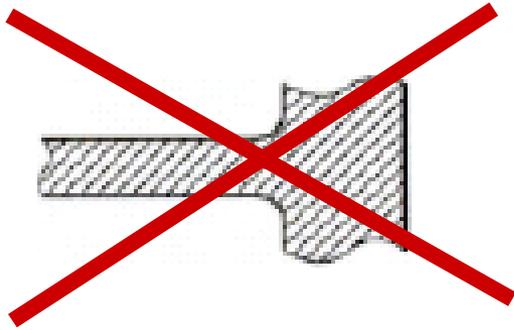


Correct

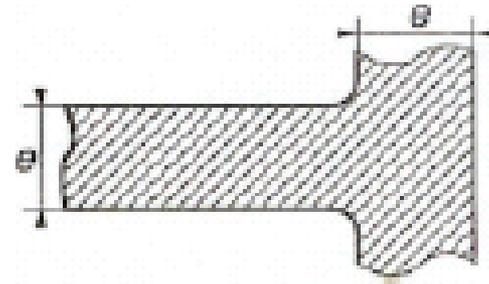
## Définition des pièces de fonderie

Le traçage des pièces de fonderie

Épaisseurs aussi uniformes que possible.



Mauvais

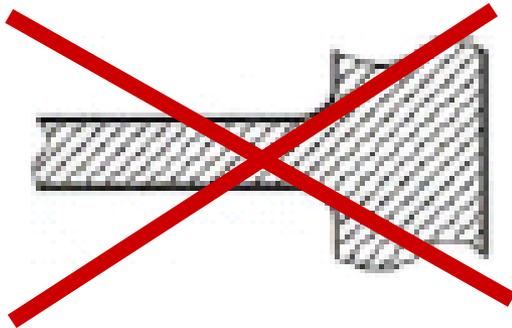


Correct

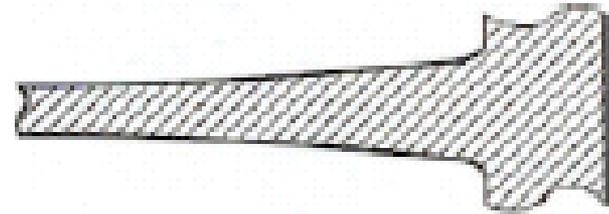
## Définition des pièces de fonderie

Le traçage des pièces de fonderie

Concevoir des raccords progressifs si les épaisseurs ne peuvent pas être uniformes



Mauvais

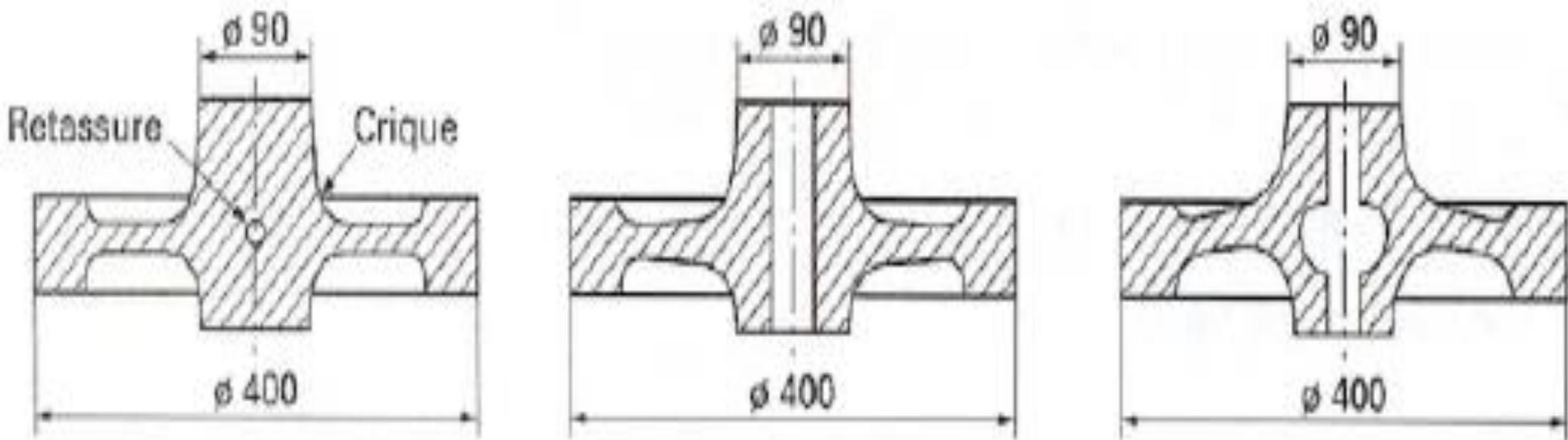


Correct

*Définition des pièces de fonderie*

Le traçage des pièces de fonderie

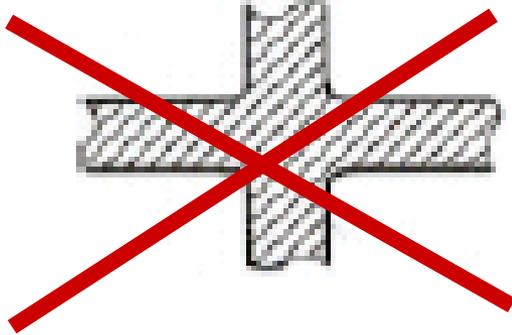
Eviter les accumulations de métal et masses de métal isolées, sources de retassures et de porosités



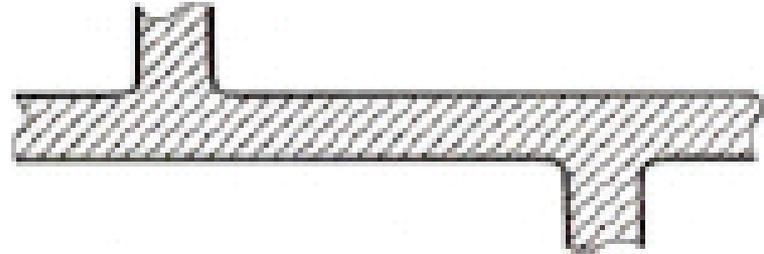
## Définition des pièces de fonderie

Le traçage des pièces de fonderie

Eviter les croisements à angle droit des toiles et des nervures pour éviter les points chauds



Mauvais

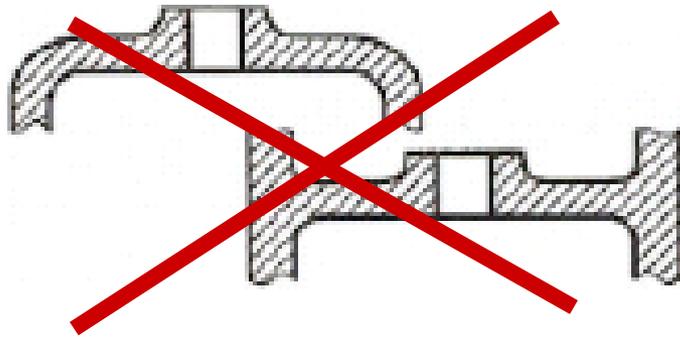


Correct

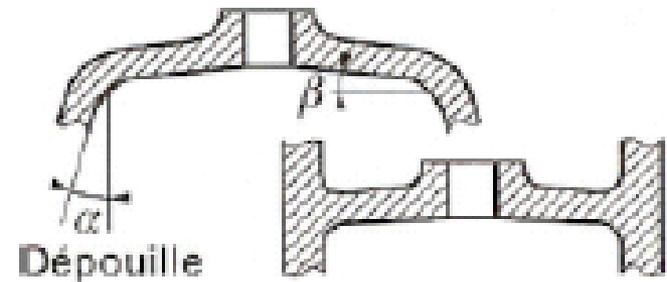
## Définition des pièces de fonderie

Le traçage des pièces de fonderie

Eviter les toiles et parois horizontales ou verticales pour faciliter le démoulage : elles nécessiteront de la dépouille.



Mauvais



Correct

- 1. Moulage à moule permanent
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- 2. Moulage à moule non permanent

- 1.a Moulage en coquille par gravité
- 1.b Moulage à basse pression
- 1.c Moulage sous pression
- 1.d. Moulage par centrifugation
  
- 2.a Moulage à **modèle** permanent
- 2.b Moulage à **modèle** perdu

## Quiz

1. Quels sont les principales clés de classification des process de fonderie
2. Quelles sont les fonderies qui permettent de réaliser des pièces en fonte
3. Quelles est la fonderie qui permet de réaliser des pièces en alliage d'alu pour des grande cadences et des grandes séries
4. Citez deux paramètres à intégrer en + lors de la conception des pièces de fonderie
5. A quoi sert un noyau ?